



ESTUDI D'UN HIVERNACLE SOLAR PASSIU MITJANÇANT L'APLICACIÓ D'UN MODEL MATEMÀTIC

Autor:

Llombart Calcena, José Miguel

Tutors:

Batiste Boleda, Oriol

Pineda Soler, Eloi

ABSTRACT

En aquest treball s'ha estudiat per una banda el comportament d'un **hivernacle solar passiu** en forma de cúpula geodèsica, durant un dia d'estiu, un altre d'hivern i en un dia d'estiu amb la presència d'una bassa d'aigua. Per altra banda s'han estudiat els principals mecanismes **d'intercanvi d'energia** que hi tenen lloc entre els seus components, comprovant quins són aquells paràmetres que presenten una major influència. Aquest estudi neix a partir de problemes climàtics específics que presenten aquests hivernacles, com les gelades d'hivern i el sobreescalfament a l'estiu. Com a eina de treball s'ha utilitzat un programa de **simulació** que consisteix en un **model matemàtic** que prediu les temperatures internes, de la coberta i del sòl, a partir d'un sistema d'equacions diferencials basat en el balanç energètic de l'hivernacle. Els resultats del model han estat comparats amb els resultats experimentals ajustant-se tots dos força bé. Aquests resultats s'han de tindre en compte per tal de millorar tant el disseny de l'hivernacle com el propi model.



ESTUDIO DE UN INVERNADERO SOLAR PASIVO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO

Autor:

Llombart Calcena, José Miguel

Tutors:

Batiste Boleda, Oriol

Pineda Soler, Eloi

ABSTRACT

En este trabajo se ha estudiado por una parte el comportamiento de un **invernadero solar pasivo** en forma de cúpula geodésica, durante un día de verano, otro de invierno, y en un día de Verano con la presencia de una balsa de de agua. Por otra parte, se han estudiado los principales mecanismos de **intercambio de energía** que se producen entre sus componentes, comprobando cuáles de ellos presentan una mayor influencia. Este estudio nace a partir de problemas climáticos específicos que presentan estos invernaderos, como las heladas en invierno, o el sobrecalentamiento en verano. Como herramienta de trabajo se ha utilizado un programa de **simulación** que consiste en un **modelo matemático** el cuál predice las temperaturas internas, de la cubierta y del suelo, a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales basado en el balance de energía del invernadero. Los resultados del modelo se han comparado con los resultados experimentales ajustándose los dos bastante bien. Estos resultados se deben tener en cuenta tanto a la hora de mejorar el diseño del invernadero, así como también el propio modelo.



STUDY OF A PASSIVE SOLAR GREENHOUSE USING A MATHEMATICAL MODEL

Autor:

Llombart Calcena, José Miguel

Tutors:

Batiste Boleda, Oriol

Pineda Soler, Eloi

ABSTRACT

In this work, we have studied the behavior of a **passive solar greenhouse** in the form of a geodesic dome. In one hand we have monitored the temperatures during the summer (without or with the presence of a storage tank) and during the winter. On the other hand, the principal **energy exchanges** between its components have been studied, with the purpose of knowing which parameters have more influence. This study was developed because of this greenhouses have to deal with some specific climate problems like frost, during winter and overheating in summer days. A program has been used to **perform various simulations**. It consists in a **mathematical model** which predicts inside air, cover and soil temperatures, by means of a set of differential equations based on the greenhouse energy balance. The results of the model have been compared with the experimental results and agreement was found between the measured and predicted values. These results should be taken into account for a better greenhouse or model design.



ÍNDEX

	pàg
1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS	7
1.1 Introducció	7
1.2 Objectius	9
2. HIVERNACLE SOLAR PASSIU	10
2.1 Funcionament d'un hivernacle solar passiu	10
2.2 Mecanismes de transmissió de la calor	11
2.2.1 Conducció	11
2.2.2 Convecció	12
2.2.3 Radiació	13
2.3 Descripció de l'hivernacle geodèsic	14
2.3.1 Situació	14
2.3.2 Dimensions i forma	14
2.3.3 Estructura i recobriment	14
3. MESURES EXPERIMENTALS	16
3.1 Mesura de les dades experimentals	16
3.2 Resultats experimentals	17
3.2.1 Dia típic d'estiu	17
3.2.2 Dia típic d'hivern	20
3.2.3 Incorporació d'una massa d'aigua	22
4. EL MODEL	29
4.1 Descripció	29



4.2 Balanç d'energia de l'hivernacle	30
4.2.1 Balanç de coberta	31
4.2.2 Balanç de l'energia de l'interior	31
4.2.3 Balanç de l'energia del sòl	31
4.3 Equacions del model	32
4.3.1 Radiació	32
4.3.2 Temperatura de l'aire interior i la coberta	33
4.3.3 Temperatura del sòl	34
5. PARÀMETRES	36
5.1 Paràmetres de valor fix	36
5.1.1 Paràmetres ambientals	36
5.1.2 Paràmetres geomètrics	37
5.1.3 Paràmetres de coberta	37
5.1.4 Paràmetres de l'aire	37
5.1.5 Paràmetres del sòl	38
5.2 Paràmetres d'estudi	40
5.2.1 T^{sky}	41
5.2.2 Transmissió i Emissivitat	43
5.2.3 Coeficients de convecció	48
6. APLICACIÓ DEL MODEL : RESULTATS I DISCUSSIÓ	51
6.1 Estiu 2006	51
6.1.1 Coeficients de convecció coberta – aire exterior (h_{ce})	51
6.1.2 Coeficients de convecció coberta – aire interior (h_{ca})	55



6.1.3 Coeficients de convecció sòl – aire interior (h_{sa})	59
6.1.4 Número de renovacions per hora	63
6.1.5 Perfil de temperatures del subsòl	66
6.1.6 Balanç global d'energia	69
6.2 Hivern 2006	71
6.2.1 Coeficients de convecció coberta – aire exterior (h_{ce})	71
6.2.2 Coeficients de convecció coberta – aire interior (h_{ca})	76
6.2.3 Coeficients de convecció sòl – aire interior (h_{sa})	80
6.2.4 Número de renovacions per hora	84
6.2.5 Perfil de temperatures del subsòl	88
6.2.6 Balanç global d'energia	89
6.3 Taula resum coeficients de convecció agost i hivern 2006	92
7 CONCLUSIONS GENERALS	93
8 ANNEXOS	96
9 BIBLIOGRAFIA	104

1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

1.1 Introducció

Els sistemes solars passius s'utilitzen principalment per a captar i acumular la calor que prové de l'energia solar. Se'ls hi diu passius degut a que no utilitzen fonts de calor a part de l'energia solar. La funció d'un hivernacle solar passiu (hivernacle solar passiu) és mantenir unes temperatures que permetin el cultiu durant el major temps possible sense utilitzar cap font de calor més que l'energia solar, tot i captant-la, emmagatzemant-la i distribuint-la de forma natural. Tot això és possible a les particulars característiques dels materials de construcció emprats, així com en l'estructura i els principis bàsics de la conducció, radiació i convecció de la calor. La reducció d'ús de substàncies contaminants per al medi ambient, una millor gestió de les matèries primes i l'optimització dels recursos naturals, constitueixen un bon recolzament per al denominat desenvolupament sostenible. Existeixen diferents dissenys d'hivernacles passius: des d'un hivernacle tradicional sense calefacció, apte en climes càlids o temperats, fins a dissenys que incorporen un sistema de captació i emmagatzematge integrat junt amb un aïllament addicional a les parts orientades al Nord, adient per a climes més freds¹. En el nostre cas, l'objecte d'estudi és un hivernacle passiu en forma de cúpula geodèsica.

La idea de dissenyar un hivernacle en forma de cúpula geodèsica no és nova i ha estat reiteradament provada des que R. Buckminster-Fuller va popularitzar les cúpules geodèsiques als anys 60 del segle XX. El mateix Buckminster-Fuller² va publicar unes instruccions a la revista Popular Mechanics el 1966 de com construir una estructura geodèsica de fusta recoberta amb film de PVC, que podia ser utilitzada com a coberta de piscina o com a hivernacle. El 1979 John Fontanetta³ va publicar un llibre on es descrivia com construir i utilitzar un hivernacle geodèsic solar, basat en l'experiència d'una sèrie de projectes realitzats a la Fordham University de Nova York. Actualment hi ha algunes empreses que comercialitzen hivernacles geodèsics, potser la més reeixida de les quals és Growing Spaces de Pagosa Springs, Colorado.

Moltes són avui en dia, les aplicacions d'un hivernacle solar passiu: Actualment es poden utilitzar per exemple com a pràctics assecadors de fruites⁴ o fins i tot com a destil·ladors

d'aigua salada⁵ per tal de poder obtenir aigua apte per a l'agricultura a partir d'aigua marina. No obstant, qualsevol activitat desenvolupada en un hivernacle solar passiu es troba supeditada a l'imprevisible comportament del clima , així com d'altres factors externs. És per això que avui en dia es desenvolupen models matemàtics capaços de predir el valor de les temperatures a l'interior de l'hivernacle, en funció dels altres factors. S'ha demostrat l'eficàcia d'aquests models per a estudiar els microclimes que es desenvolupen a l'interior dels hivernacles com efecte de la interacció entre l'atmosfera interna i la vegetació⁶ per a estudis del comportament del sòl sota cobertes de plàstic a diferents profunditats⁷ per avaluar el grau d'humitat⁸ per al control de vivers en aquicultura⁹ o per estudiar també l'efecte d'una massa d'aigua com acumulador d'energia¹⁰.



Figura 1: Buckminster-Fuller

1.2 Objectius

En aquest treball, s'analitzen per una part les dades empíriques obtingudes sota tres condicions diferents : estiu, hivern i estiu amb la presència d'una bassa d'aigua, per tal d'observar el comportament de l'hivernacle, amb la finalitat de comprovar que aquest hivernacle solar passiu amb forma de cúpula geodèsica pogués ésser autosuficient o apte per a l'agricultura a petita escala. En una segona part, es farà servir el model per a obtenir les prediccions de la Temperatura interna, del sòl i de la coberta de l'hivernacle utilitzant diferents valors dels principals paràmetres, tot i comparant les temperatures internes predites amb les reals, per tal de veure si el model s'ajusta al cas real. Es tracta d'un model senzill que permet estudiar principalment la problemàtica que comporta un excés de calor en un dia d'estiu, així com una gelada o unes temperatures excessivament baixes durant l'hivern¹¹. L'objectiu doncs, d'aquesta segona part del treball serà, mitjançant com a eina el model matemàtic, determinar aquells paràmetres que més poden influir en la variació de temperatures de l'hivernacle, per tal d'establir estratègies que permetin optimitzar el disseny de l'hivernacle amb el mínim cost possible, així com el de poder afegir millores al propi model, per tal que s'hi atansi lo màxim possible al cas real.

2. HIVERNACLE SOLAR PASSIU

2.1. Funcionament d'un hivernacle solar passiu

La particularitat que presenta un hivernacle passiu respecte un d'actiu és la de no utilitzar combustibles o electricitat, utilitzant d'aquesta manera, estratègies més econòmiques i respectuoses amb el medi ambient. Per aconseguir aquesta fi, caldrà captar el màxim d'energia durant el dia sense arribar a un excés (sobreescalfament) i que aquesta s'aprofiti per evitar que l'hivernacle es refredi durant les hores d'absència de sol.

Durant el dia, un petit percentatge de la radiació serà reflectida, una altra part serà absorbida per la coberta per a ésser emesa cap a l'atmosfera a posteriori i la major part serà transmesa cap a l'interior de l'hivernacle.

La radiació solar es transmet en forma d'ones electromagnètiques de baixa longitud d'ona (corresponent a la banda del visible i amb alta capacitat de penetració), la major part de les quals serà absorbida per la pròpia estructura de l'hivernacle, el sòl i les plantes. Aquesta energia serà després emesa com a radiació de llarga longitud d'ona (corresponent a la banda de l'infraroig i baixa capacitat de penetració). Això és degut a que el material de la coberta es comporta diferent segons sigui la natura de la radiació: és transparent a la radiació visible però opac a l'infraroig, fent que la pèrdua de calor sigui menor.

El vidre és un material que presenta una elevada transmissió per a la radiació visible i gran opacitat a l'infraroig. Malgrat això, el material de la nostra coberta és un plàstic tricapa de Polietilè amb una capa intermèdia d'EVA, ja que s'ha vist que comporten de manera similar a la del vidre (malgrat no presentar opacitat total a l'infraroig), i que a més no presenten alguns inconvenients del vidre, com són l'alt cost econòmic i la seva fragilitat.

El sòl de l'hivernacle participa activament ajudant a evitar una pujada brusca de temperatures durant el dia per una banda, i a esmorteir la pèrdua de calor al arribar la nit. Això ho aconsegueix gràcies a la seva inèrcia tèrmica, ja que, en presentar una elevada capacitat calorífica (necessita molta calor per augmentar un 1°C la seva temperatura), el sòl

trigarà en escalfar-se, i a més serà un gran magatzem calorífic. Per tant, la calor absorbida pel sòl es transmet cap a capes més profundes mitjançant el fenomen de conducció, i serà irradiada com radiació infraroja cap a l'aire de l'interior durant la nit, evitant un refredament significatiu de l'hivernacle.

La superfície del sòl no arriba a sobreescalfar-se gràcies als moviments convectius de l'aire de l'interior: l'aire més proper a la superfície del sòl s'escalfa fent-se més lleuger, i expandint-se i elevant-se cap a la part superior de l'hivernacle. D'aquesta manera, serà reemplaçat per l'aire més fred i dens, que tendeix a baixar i que absorbirà calor del sòl per escalfar-se i tornar a pujar... La geometria geodèsica del nostre hivernacle optimitza els intercanvis per convecció, degut a l'absència d'escaines on es pugui estancar aire, formant-se bosses aïllades.

La convecció per sí mateixa no serà suficient per a evitar un sobreescalfament, ja que en ésser gairebé nul l'intercanvi d'aire amb l'exterior, ens trobem amb un sistema en estat transitori on la temperatura aniria pujant gradualment durant el dia. Aquest fet s'evita mitjançant renovacions de l'aire interior.

2.2 Mecanismes de transmissió de la calor

Aquests són els principals mecanismes de transmissió de calor que regeixen el funcionament d'aquest tipus d'hivernacle:

2.2.1 Conducció

És la transferència de calor que es produeix entre dos medis sòlids a través de l'energia cinètica de les partícules que els conformen, degut a l'existència d'un gradient de temperatura entre ells. El calor fluïrà de la regió amb major temperatura fins a la regió on aquesta és menor. La velocitat a la qual es transmet el calor per conducció “ Q_k ”, és proporcional al gradient de temperatura “ dT/dx ” per l'ària (A) a través de la qual es transmet el calor, i es pot predir mitjançant la llei de Fourier :

$$Q_k = -KA \, dT/dx$$

“ $T(x)$ ” és la temperatura local i “ x ” és la distància en la direcció del flux de calor. La velocitat real de transmissió de calor depèn de la conductivitat tèrmica “ K ”, que és una propietat intrínseca dels materials i que representa la major o menor facilitat de el calor per circular a través dels cossos en qüestió.

Consisteix en una expressió que relaciona el flux d'energia tèrmica amb la temperatura .

Propietats qualitatives del flux de calor:

- 1) Si la temperatura és constant en una regió \Rightarrow l'energia tèrmica no flueix.
- 2) Si hi ha diferència de temperatura, l'energia tèrmica flueix de la regió més calenta a la més freda, d'aquí el signe negatiu.
- 3) A més diferència de temperatura (per al mateix material), més gran serà el flux d'energia tèrmica.
- 4) El flux d'energia tèrmica és diferent per a diferents materials, inclús amb la mateixa diferència de temperatura.

2.2.2 Convecció

És un mecanisme de transferència de calor que es produeix degut al moviment d'un fluid Sobre una superfície. En el cas de l'aire aquest moviment es pot produir de forma natural per la diferència de temperatures (l'aire calent és menys dens i tendeix a pujar, mentre que el fred és més dens i baixa per substituir aquest volum d'aire desplaçat), o de manera forçada, quan intervé el vent o algun aparell del tipus ventilador.. En el nostre cas, només tindrem en compte els processos convectius de l'aire .

La calor extreta per convecció es descriu per la llei de refredament de Newton. Aquesta llei ens diu que la velocitat a la que un cos es refreda en un medi a temperatura constant és directament proporcional a la diferència de temperatures entre el cos i el medi:



$$Q_c = hA (T_1 - T_2)$$

On h és el coeficient de convecció.

El valor de la calor intercanviada en els processos de conducció i convecció es pot expressar de la forma general:

$$Q = KA (T_1 - T_2)$$

2.2.3 Radiació

És la transferència de calor existent entre cossos que no es troben en contacte, ja que tot material emet radiació electromagnètica, la intensitat de qual dependrà de la temperatura a la que es trobi, en això es basa la llei de Stefan Boltzmann:

$$E = \sigma T_e^4$$

On T_e és la temperatura efectiva, o sigui la temperatura absoluta de la superfície i σ és la constant de Stefan Boltzmann : $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4$. La Superfície en qüestió rep el nom de radiador ideal o cos negre. La potència emissiva superficial d'una superfície real és menor que el d'un cos negre a la mateixa temperatura (parlem en aquest cas de cos gris) i ve donada per:

$$E = \epsilon \sigma T_e^4$$

On ϵ és una propietat de la superfície anomenada emisivitat. Amb valors en el rang $0 \leq \epsilon \leq 1$ aquesta propietat és la relació entre la radiació emesa per una superfície real i la emesa pel cos negre a la mateixa temperatura. Això depèn molt del material de la superfície i del seu acabat, de la longitud d'ona, i de la temperatura de la superfície.

2.3 Descripció de l'hivernacle geodèsic

2.3.1. Situació

L'hivernacle sobre el qual es basa aquest treball es troba situat a la casa Miquel Farré de la població de Llavorre. Aquesta localitat es troba al municipi de la Guingueta d'Àneu a la comarca del Pallars Sobirà de l'Alt Pirineu. Llavorre es troba situat a 1.360 m sobre el nivell del mar.

2.3.2. Dimensions i forma

La forma escollida ha sigut semiesfèrica amb una base de 7m de diàmetre, una superfície útil d'uns 38m² i un volum total de 90m³. Com a resultat, l'altura zenital és de 3,5m. L'elecció d'una forma geodèsica ve motivada per la gran optimització en l'ús de materials i la possibilitat d'estandaritzar el procés de fabricació, així com per la seva gran resistència i el volum que fàcilment pot engloba. A més, a més, ofereix una estètica atractiva amb reminiscències futuristes. Un altre avantatge de la forma semiesfèrica és que afavoreix la barreja interior al poder establir-se fàcilment circulacions globals sense zones d'estancament, com passa en les cantonades de recintes de secció rectangular. A més, la planta circular de l'hivernacle s'adapta perfectament a la cobertura dels tancs circulars usats en diversos tipus de reactor biològic, cosa que obre la porta a moltes possibles aplicacions.

2.3.3. Estructura i recobriment:

L'estructura està composta per 70 barres de fusta de 8 x 4cm de secció i de 2m de longitud. Aquestes peces es roben unides mitjançant perfils d'alumini de 40x40x4cm fent servir una totalitat de 140 cargols de mètrica 10. L'objectiu ha estat utilitzar un mínim de peces diferents per a simplificar el procés de fabricació i abaratir-ne el cost. L'elecció de la fusta com a material principal de l'estructura ofereix a banda d'un cost econòmic baix, una despesa energètica mínima en l'elaboració del material.

El pes de la estructura és d'aproximadament 200Kg. Gràcies a la isotropia de l'estructura, aquesta es podria adaptar fàcilment a diferents condicions independentment del lloc on es construeixi, oferint un baix coeficient de resistència aerodinàmica.

L'estructura es recobreix amb un film polimèric, també amb l'objectiu de minimitzar tant el cost, el pes i la despesa energètica en el material. Es tracta d'un film tricapa, on les cares interna i externa de la coberta estan constituïdes per Polietilè, mentre que la capa del mig ho està d'EVA (copolímer Etil-Acetat de Vinil. Com avantatge, l'EVA presenta més transparència a la llum visible que el Polietilè tèrmic quan el material és nou, major resistència a L'UV i una gran opacitat per l'IR gràcies a l'Acetat de Vinil (VA) (és necessari del 15 al 18% de VA per aconseguir un bon nivell tèrmic per a un espessor de 0,15 a 0,2 mm), però com a contrapartida aquest disminueix la seva resistència mecànica. Altres inconvenients de l'EVA respecte el Polietilè són el preu, la seva excessiva plasticitat (quan s'estiren no es recuperen), la seva adherència a la pols (el que pot significar reduccions de fins i tot un 15% en transmissivitat a la radiació solar) i la dificultat que presenten a l'hora de netejar-los, degut a la seva gran càrrega electrostàtica.

Per la seva lleugeresa l'estructura no necessita fonaments; simplement va anclada mitjançant ancoratges (piquetes d'acer) directament al terreny.



Figura 2 : Hivernacle geodèsic

3. MESURES EXPERIMENTALS

3.1 Mesura de dades experimentals

Per a mesurar tant les temperatures externes com internes es van utilitzar com elements de mesura un parell de termòmetres/enregistradors de la marca comercial TESTO, model 175-H2, els quals estan dotats d'uns sensors interns d'humitat i temperatura el rang de detecció dels quals va des de -20°C a 70°C , i des de 0 fins al 100% d'humitat. Cada enregistrator pot emmagatzemar fins a un total de 16.000 dades, i està proveït d'una pantalla d'LCD. A més, cada unitat ve amb un software que permet el traspàs de les dades, així com el seu tractament a l'ordinador.

A l'hora de col·locar els termòmetres es va tenir cura, de que no incidís la llum directa, i la unitat de l'interior es va col·locar a un metre per sobre del nivell del terra. També es van realitzar algunes mesures puntuals de la temperatura del subsòl a profunditats de 0,1 m (4°C) i 0,2 m (6°C) utilitzant una sonda termoaparell. A continuació es mostra en detall l'enregistrator de temperatures TESTO utilitzat:

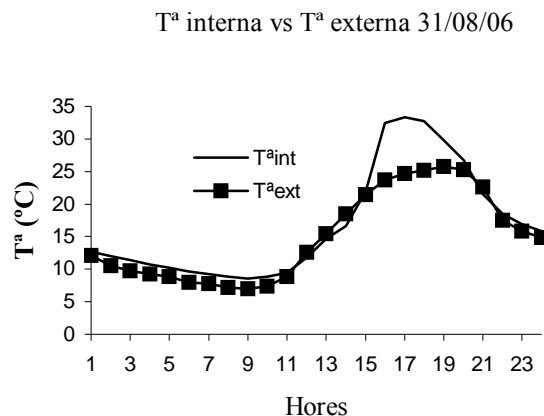


Figura 3: Termòmetre/enregistrator TESTO

3.2 Resultats experimentals

3.2.1. Estiu

El següent gràfic representa el comportament de l'hivernacle mitjançant un perfil de temperatures interiors i exteriors en un dia d'estiu:



Gràfic 1: Comparació de les temperatures internes i externes; 31 d'agost del 2006

Cal dir que el període de temps en que s'han pres les mesures correspon a un mes d'agost atípic, caracteritzat per unes temperatures menors a les d'anys enrere, degut segurament a una climatologia més influenciada per nuvolositat abundant acompanyada de pluges i vents moderats.

Es pot observar com la temperatura comença a pujar ràpidament cap a les 10-11h del dia, havent-hi un període de temps en que l'hivernacle encara no ha tingut temps d'escalfar-se, i per tant, les temperatures externes seran superiors a les internes, fins cap allà a les tres de la tarda on a partir d'aquí predominen les internes per damunt de les externes, fins a la entrada de la nit.

A continuació es presenten unes taules que resumeixen les temperatures (°C) d'aquest dia:

	2006		
T^a Diürnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	33,33	26,20	7,13
Mínima	7,00	7,20	-0,20
Mitjana	21,70	19,00	2,70

Taula1: Resum de les temperatures diürnes; 31 agost del 2006

	2006		
T^a Nocturnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	26,70	19,40	7,30
Mínima	8,60	7,00	1,60
Mitjana	12,70	11,10	1,60

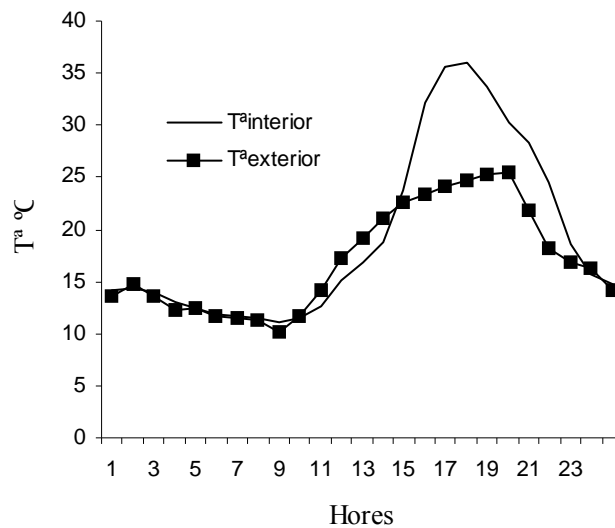
Taula 2: Resum de les temperatures nocturnes; 31 agost del 2006

Durant el dia (de 7 a 20 h), la temperatura mitjana de l'interior serà de 21,70°C ,amb un màxim de 33,00°C (a les 17 h) i un mínim de 7,00°C (a les 9 h).Les diferències entre l'interior i l'exterior rondaran els 2,70°C, essent la màxima diferència de 8,70°C (a les 16 h).

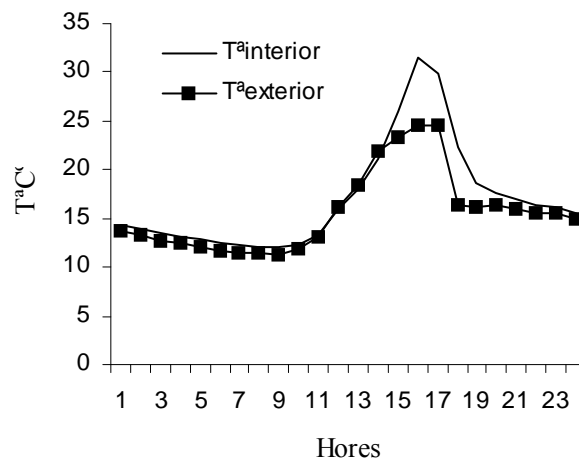
Durant la nit (de 20 a 7 h), la temperatura mitjana de l'interior serà de 12,70°C ,amb un màxim de 26,70°C (a les 20h) i un mínim de 8,60°C (a les 6 h).Les diferències entre l'interior i l'exterior rondaran els 1,6°C,essent la màxima diferència de 1,6°C (cap a les 6h).

A continuació es compara el gràfic anterior amb un cas en que hi han hagut pèrdues d'energia en forma de calor, degut a una davallada de la temperatura exterior, al mes de setembre. Destaca el canvi brusc en el pendent de la corba en arribar les 17h:

T^a_{int} vs T^a_{ext} 29/08/2006



$T^a_{interior}$ vs $T^a_{exterior}$ 09/09/2006



Gràfics 2 i 3 : Comparació temperatures internes i externes entre un dia d'agost i un altre de setembre.

Com a conclusions podem dir que a l'estiu tant durant el dia com a la nit, les temperatures mitjanes de l'hivernacle es troben dins del rang biològic (10-34°C) per al creixement de certs vegetals com són les hortalisses majors (tomàquets, cogombres, etc.), essent possible l'aplicació d'aquest per a realitzar alguna classe de cultiu d'aquest tipus.

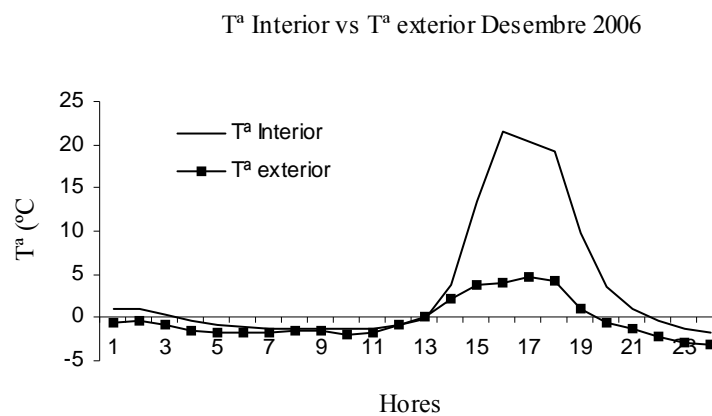
D'altra banda, durant el dia s'aconsegueix una temperatura mitjana de 21,70°C, arribant així gairebé a l'òptim fisiològic per al cultiu en qüestió (22-23°C) mentre que a la nit

s'assoleix una temperatura mitjana de $12,70^{\circ}\text{C}$, essent l'òptima de $18,00^{\circ}\text{C}$. També s'ha vist algun punt crític, com el mínim de $7,00^{\circ}\text{C}$ a les 9 h (essent la temperatura interior menor que la exterior), ja que per sota de $10,00^{\circ}\text{C}$ aquest tipus de vegetals careixen de desenvolupament i creixement net.

Cal remarcar que les dades de que disposem no corresponen amb un dia típicament calorós d'agost, per al que s'esperarien unes temperatures externes i internes superiors, arribant per tant a sobrepassar l'òptim biològic durant el dia, podent inclús arribar a ser perjudicials per a segons quin cultiu.

3.2.2. Hivern

El següent gràfic representa el comportament de l'hivernacle mitjançant un perfil de temperatures interiors i exteriors en un dia d'hivern:



Gràfic 4 : Comparació de les temperatures internes i externes; desembre 2006

El dia en qüestió (31/12/06/) presenta una freda matinada amb unes temperatures que no arriben a 1°C ($0,5^{\circ}\text{C}$) allà cap a la 1:00 h. Cap a les 11:00 h començarà a augmentar la Tª externa i serà a les 12:00 h quan comenci a escalfar-se l'interior de l'hivernacle. La Tª interna anirà augmentant fins arribar a un màxim de $21,5^{\circ}\text{C}$ a les 16:00 h.

A mesura que es va ponent el sol, cap a les 16:00-17:00 h es va produint una davallada constant de Tª, i ja quan arriba la nit (18:00 h) s'observa una davallada en picat de Tª fins arribar al voltant als 3°C a l'interior de l'hivernacle, moment a partir del qual té lloc una

gran recuperació, produint-se fins i tot un altre augment progressiu de T^a , en una més càlida matinada del dia 01/01/07.

A continuació es presenten unes taules que resumeixen les temperatures ($^{\circ}\text{C}$) d'aquest dia:

	Dia 31 desembre	2006	
T^a Diürnes($^{\circ}\text{C}$)	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	21,50	16,90	4,60
Mínima	-1,40	-0,90	0,50
Mitjana	6,80	5,80	1,00

Taula 3 : Resum de les temperatures diürnes; 31 de desembre del 2006

	Dia 31 desembre	2006	
T^a Nocturnes($^{\circ}\text{C}$)	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	9,75	1,00	8,75
Mínima	-1,80	-3,10	1,30
Mitjana	1,00	-1,30	2,30

Taula 4 : Resum de les temperatures nocturnes; 31 de desembre del 2006

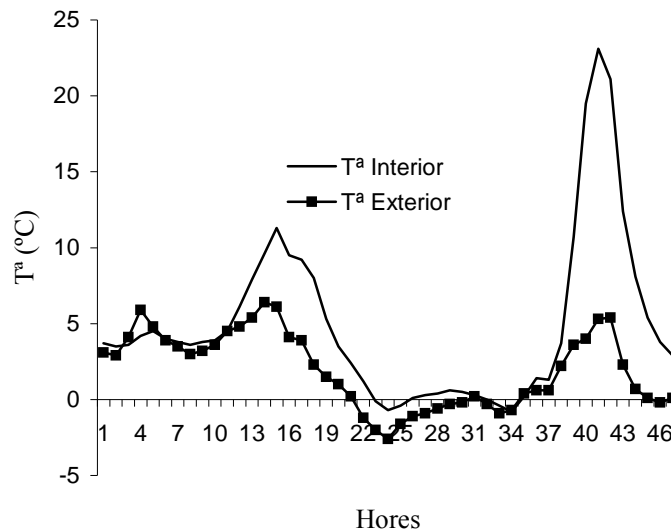
Durant el dia (de 8:00 h a 18:00 h) la temperatura mitjana de l'interior serà d'6,80 $^{\circ}\text{C}$, amb un màxim de 21,50 (a les 16 h) i un mínim de -1,40 $^{\circ}\text{C}$ (a les 11:00 h) . La màxima diferència entre l'interior i l'exterior es produeix a les 16 h, essent aquesta d'uns 17,00 $^{\circ}\text{C}$.

Durant la nit (de 19:00 h a 7:00 h), la temperatura mitjana de l'interior serà d'1 $^{\circ}\text{C}$, amb un màxim de 9,75 $^{\circ}\text{C}$ (a les 19h) i un mínim de -1,80 $^{\circ}\text{C}$ (a les 24:00 h). La màxima diferència entre l'interior i l'exterior es produeix a les 19 h, essent aquesta d'uns 9 $^{\circ}\text{C}$.

A continuació es mostra un gràfic en el que es representen la temperatura externa i la de l'interior de l'hivernacle, durant un cicle de 48 h que comprenen els dies 8 i 9 de desembre del 2006. En aquest cas, la transició entre el dia 8 i 9 ve donada per una gèlida matinada, on l'hivernacle presentarà un mínim a les 00 h de -0,70 $^{\circ}\text{C}$ (-2,7 $^{\circ}\text{C}$ a l'exterior) amb una recuperació que arribarà fins a un màxim de 0,60 $^{\circ}\text{C}$ (0,30 $^{\circ}\text{C}$ a l'exterior) i finalment tornarà

a decaure fins a un mínim de $-0,80^{\circ}\text{C}$ ($-0,70^{\circ}\text{C}$ a l'exterior) per a tornar-se a recuperar cap a les 14:00 h del dia 9/12/2006.

T^{a} Interior vs T^{a} Exterior 8 i 9 de desembre 2006



Gràfic 5 : Comparació de les temperatures interiors i exteriors; 8 i 9 de desembre de 2006.

Com conclusions pel que fa al cas d'hivern, les temperatures mitjanes a dins de l'hivernacle es troben, tant a la nit com durant el dia ($1,00$ i $6,80^{\circ}\text{C}$) per sota del rang biològic ($10,00$ - $34,00^{\circ}\text{C}$) per al creixement de certs vegetals com són les hortalisses majors (tomàquets, cogombres, etc.), no essent possible l'aplicació d'aquest per a realitzar alguna classe de cultiu d'aquest tipus. Per tant, i tenint en compte la temperatura crítica d'aquests vegetals (10°C), seria impossible poder mantenir un conreu d'aquest tipus a l'hivern, degut a les baixes temperatures, sobretot a la nit.

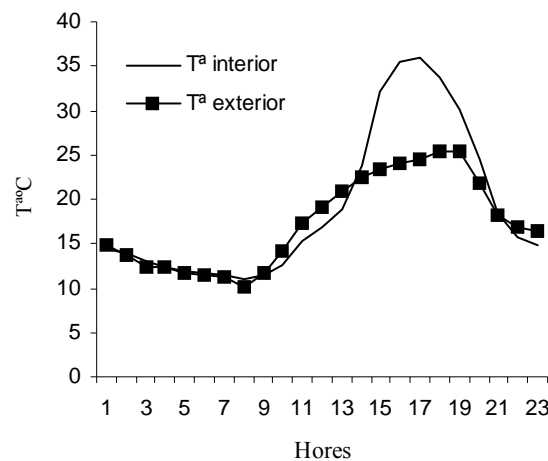
3.2.3. Estiu amb incorporació d'una bassa d'aigua

A l'any següent de la primera experiència es van obtenir noves dades de temperatura, havent-hi afegit una bassa d'aigua, per tal d'observar possibles diferències en els perfils de temperatura. Aquesta bassa feia uns 7m^2 i 30cm de profunditat, amb lo que podia contenir una quantitat aproximada de 2000 litres d'aigua.

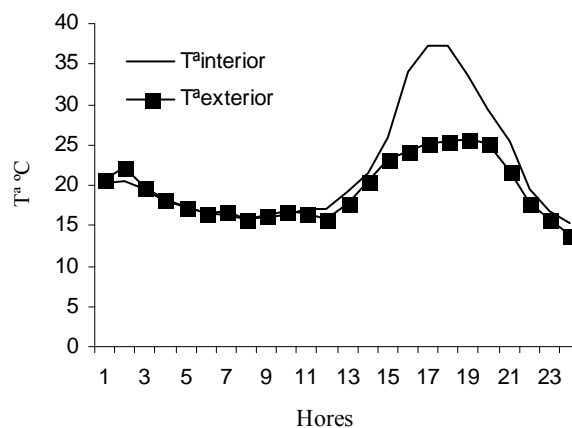
La idea era avaluar qualitativament la capacitat de la massa d'aigua d'emmagatzemar l'energia calorífica que li arribava de la radiació solar,gràcies a la seva elevada capacitat calorífica, així com la d'alliberar-la després mitjançant intercanvis d'energia per radiació (de llarga longitud d'ona) i convecció,amb l'aire de l'interior. D'aquesta manera,el que es vol aconseguir és ajudar a evitar les excessives temperatures diàries a l'estiu, així com les baixes temperatures a les nits d'hivern.

A continuació es presenten dos gràfics: en ells es representen les temperatures en front del temps,en un dia qualsevol d'estiu i amb la presència (2007) o no (2006) d'una massa d'aigua afegida.

T^a interior vs T^a externa 29/08/2006



T^a interna vs T^a exterior 29/08/2007



Gràfics 6 i 7 :Comparació de temperatures internes i externes en un dia d'estiu amb bassa d'aigua (2007) i un altre sense (2006).

Les taules que resumeixen les temperatures (°C) són les següents:

	2007		
T^a Diürnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	37,30	25,60	11,70
Mínima	16,00	15,70	0,30
Mitjana	25,47	21,09	4,38

	2006		
T^a Diürnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	36,00	25,50	10,50
Mínima	11,10	10,20	0,90
Mitjana	23,27	19,75	3,52

Taula 5 i 6: Resum de temperatures diürnes en un dia d'estiu amb bassa d'aigua (2007) i un altre sense (2006); 29 d'Agost

	2007		
T^a Nocturnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	25,50	22,30	3,20
Mínima	15,20	13,80	1,40
Mitjana	18,41	17,94	0,47

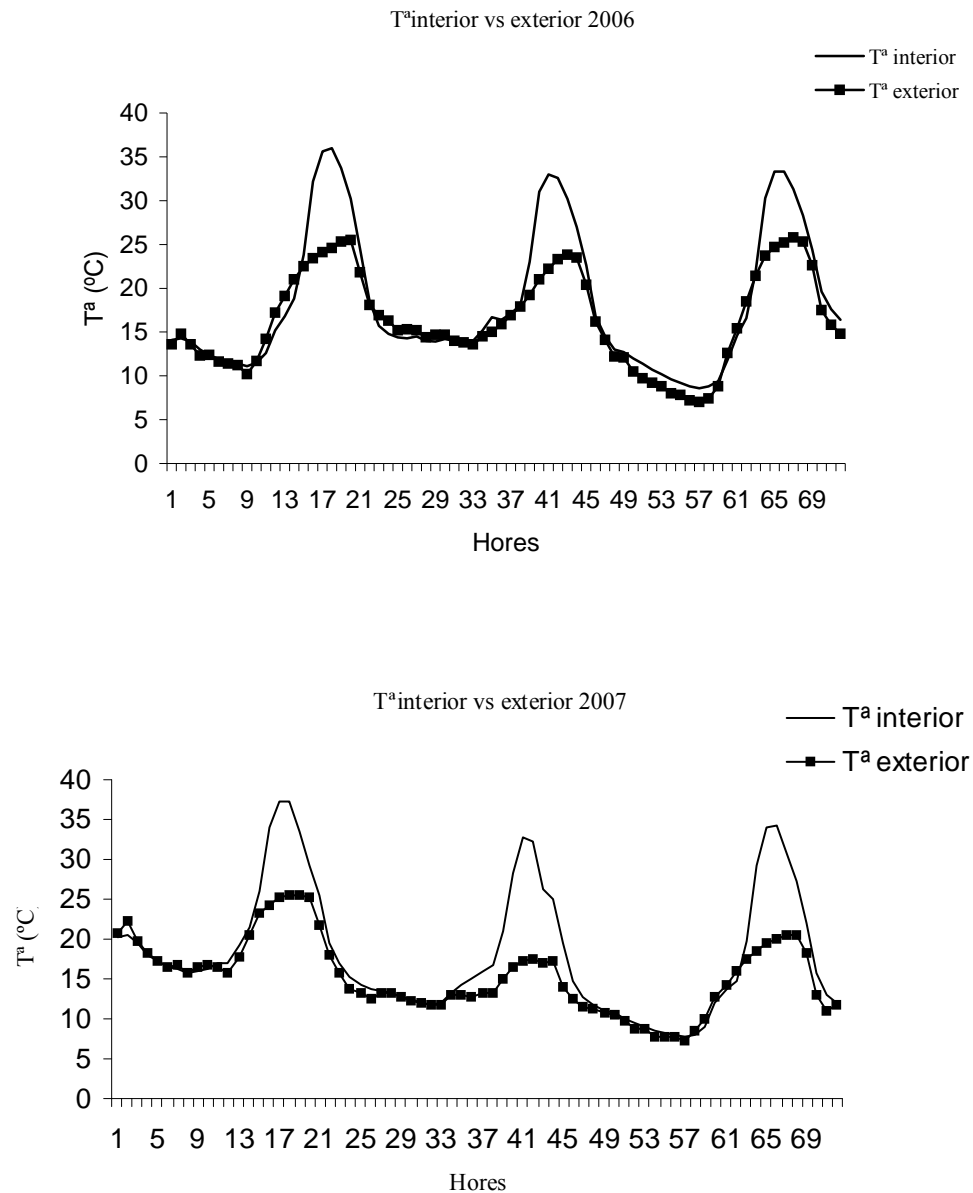
	2006,00		
T^a Nocturnes	T^a Interior	T^a Exterior	Diferència
Màxima	24,50	18,10	6,40
Mínima	11,10	10,20	0,90
Mitjana	14,40	13,58	0,82

Taules 7 i 8 : Resum de temperatures nocturnes en un dia d'estiu amb bassa d'aigua (2007) i un altre sense (2006); 29 d'agost.

Pel que fa durant el dia, sembla ser que al 29 d'agost del 2007 no va fer gaire sol, ja que al gràfic s'observa com a les hores de major intensitat solar (de 12-15h), les temperatures de l'exterior són més baixes que a l'interior de l'hivernacle. Lo contrari passa al 2006, on el comportament és més com s'espera. A més, degut a la presència de la massa d'aigua esperaríem que aquesta absorbeixi energia calorífica, de tal manera que l'interior s'escalfés menys, i per tant, que les diferències de temperatures mitjanes entre l'interior i l'exterior fossin menors, i tal com indica el quadre són majors aquestes diferències, que sense la presència de la massa d'aigua (diferència de 4,38°C al 2007 vs 3,52 °C al 2006).

Durant la nit, s'observa com la diferència entre les temperatures mitjanes de l'interior i l'exterior són menors amb la presència de la massa d'aigua (0,50°C) que sense (1,20°C). Aquest fet senyalaria que la massa d'aigua no provoca un augment significatiu de les temperatures a la nit. Malgrat aquest fet, comparant tots dos gràfics, s'observa com al acostar-se la nit, al del 2006 les temperatures comencen a descendir més aviat que al 2007. A més, arribaran a igualar-se o fins i tot a sobrepassar a les temperatures exteriors. En canvi al 2007 s'observa una davallada de temperatures més suavitzada.

Els gràfics de continuació mostren els perfils de temperatura de tres dies consecutius de l'estiu del 2006 i 2007 (1, 2 i 3 de setembre). En ells es pot observar de nou la suau davallada de temperatures durant les primeres hores del matí en el 2007:



Gràfics 8 i 9: perfils de temperatures tres dies consecutius a l'estiu del 2006 i del 2007

Aquesta davallada de temperatures més suavitzada es pot veure representada per la diferència de la temperatura màxima diària i la mínima nocturna, on per exemple en el cas del 29/08/2007 és de 22,10 °C vs 29/08/2006 que és de 24,90 °C.

Durant les primeres hores del matí i fins al migdia, les temperatures internes i externes es mantenen a uns pocs graus de diferència, podent-hi haver alguns punts crítics on la temperatura interna pugui arribar a ser significativament més baixa que la externa. A partir de les 00:00 h, les temperatures de l'interior i de l'exterior tendiran a ser força

similars, amb pocs graus de temperatura de diferència, excepte en alguns punts on poden aparèixer diferències de temperatura negatives, és a dir, on les temperatures internes estiguin per sota de les externes.

A la següent taula es representa les diferències de temperatura interna i externa per al 2006 i 2007, al tram horari comprés des de les 00 h fins a les 12 h del dia 29 d'agost:

29.08.2006	T ^a int (°C)	T ^a ext (°C)	dif(°C)
00 h	14,10	13,60	0,50
01 h	14,30	14,80	-0,50
02 h	13,90	13,60	0,30
03 h	13,00	12,30	0,70
04 h	12,40	12,40	0,00
05 h	11,90	11,60	0,30
06 h	11,60	11,40	0,20
07 h	11,40	11,20	0,20
08 h	11,10	10,20	0,90
09 h	11,50	11,70	-0,20
10 h	12,60	14,20	-1,60
11 h	15,20	17,20	-2,00
12 h	16,80	19,10	-2,30

29.08.2007	T ^a int (°C)	T ^a ext (°C)	dif(°C)
00 h	20,30	20,80	-0,50
01 h	20,40	22,30	-1,90
02 h	19,50	19,80	-0,30
03 h	18,10	18,20	-0,10
04 h	17,20	17,30	-0,10
05 h	16,60	16,60	0,00
06 h	16,30	16,70	-0,40
07 h	15,80	15,70	0,10
08 h	16,00	16,40	-0,40
09 h	16,20	16,70	-0,50
10 h	17,00	16,60	0,40
11 h	17,10	15,70	1,40
12 h	19,20	17,80	1,40

Taules 9 i 10 : Diferències de temperatures internes i externes durant el tram des de les 00 h fins les 12 h el dia; 29 d'agost del 2006 i del 2007.

Segons els resultats, durant el tram horari de 0h a 8h les temperatures internes i externes arriben a uns valors propers, produint-se lleugeres fluctuacions poc importants, a excepció d'un punt crític que apareix a les 01 h del 29/08/2007, que indica una diferència de temperatures al voltant dels -2,00°C. A partir de les 10 h, es pot observar quantitativament, com les temperatures externes del 2006 pugen ràpidament.



Pel que fa a les comparacions dels perfils de temperatura , per avaluar quin seria l'efecte d'afegir una massa d'aigua a l'hivernacle, no són del tot fiables degut a que les dades climàtiques pertanyen a dos estius diferents, per tant l'estudi en aquest cas s'hauria haver realitzat en paral·lel sota les mateixes condicions. Malgrat això, podem, mitjançant les diferències de temperatura, comparar els resultats qualitativament a través de les amplituds tèrmiques per als diferents trams del dia. Seguint aquest criteri, com a conclusió podem dir que no s'ha pogut veure com el fet d'afegir-la ens provocava una disminució significativa de temperatures de l'interior durant el dia, així com un augment durant la nit. El que sí em pogut comprovar és l'efecte esmorteïdor que fa que la davallada de temperatures en arribar la nit, no sigui gaire brusca.

4. EL MODEL

4.1 Descripció del model

El model ha estat elaborat per a poder estudiar en detall els diferents mecanismes responsables del microclima de l'hivernacle, per tal de poder actuar en front de les temperatures extremes. El model ens ha de servir per a predir les temperatures que assolirem dins l'hivernacle donades unes determinades dades i condicions externes. D'aquesta manera es podrà avaluar la seva validesa tot i comparant els resultats que ens dóna el model, amb les dades empíriques de les que disposem.

Per a l'elaboració del model s'han tingut en compte les següents consideracions:

- a) S'ha aplicat un factor de reducció de l'energia subministrada per la radiació solar Ψ , en lloc d'aplicar de forma detallada el balanç associat a l'evapotranspiració de les plantes (no s'ha considerat la presència de vegetació)
- b) L'aire de l'interior es troba en estat de barreja perfecta, de manera que no existeix cap gradient intern de temperatura.
- c) No s'han tingut en compte la humitat interior, així com els fenòmens de condensació-evaporació.
- d) Les condicions de contorn del model venen donades per la temperatura del subsòl a una certa profunditat T_{ss} , la temperatura de l'aire exterior $T_{ext}(t)$, i la temperatura efectiva de radiació del cel T_{sky} .
- e) Tots els coeficients de convecció s'han considerat constants.
- f) De cara a la incidència de la radiació solar, s'ha considerat la superfície de l'hivernacle com a plana.
- g) S'ha elaborat un model unidimensional per al sòl.

4.2 Balanç d'energia de l'hivernacle

El balanç tèrmic de l'hivernacle representa les entrades i sortides d'energia que hi tenen lloc, les quals venen descrites per equacions diferencials del sòl, la temperatura interior i de la coberta, on s'hi especifica el mecanisme d'intercanvi de calor que hi participa.

Els intercanvis de calor entre els diferents elements de l'hivernacle es representen a la figura 2. La radiació solar incideix sobre la coberta de l'hivernacle de manera que una part és reflectida, una altra part és absorbida i la resta es transmet a través del material de coberta. La part transmesa és parcialment absorbida pel sòl (i per la cobertura vegetal en cas que n'hi hagi) i transformada en calor. En escalfar-se la capa superior del sòl, part de la calor es difon per conducció cap al subsòl, i part es transmet a l'aire per un mecanisme de convecció tèrmica (l'aire en contacte amb el sòl s'escalfa per conducció i la disminució de la densitat produïda per l'expansió tèrmica posa l'aire en moviment). El sòl perd calor també pels intercanvis de calor en forma de radiació tèrmica amb la coberta i l'exterior. L'aire interior de l'hivernacle intercanvia calor mitjançant dos mecanismes; la convecció amb la coberta i per l'intercanvi d'aire amb l'exterior degut a la ventilació i les infiltracions. La coberta, a més del guany degut a l'absorció de radiació solar, i els bescanvis ja mencionats per convecció o amb l'aire i radiació amb el sòl, perd calor mitjançant convecció amb l'aire exterior i per radiació amb l'ambient.

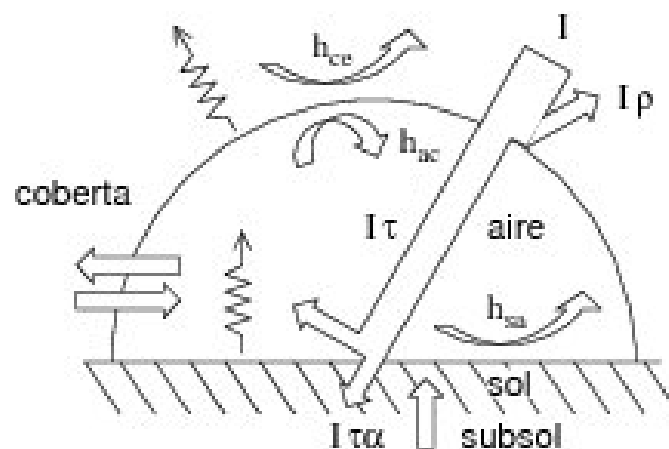


Figura 4: Esquema dels mecanismes d'intercanvi de calor considerats en el model.



A continuació s'enumeren els diferents intercanvis d'energia que tenen lloc a l'hivernacle:

4.2.1 balanç de coberta

Guanys:

- 1) Radiació solar absorbida per la coberta.
- 2) Radiació tèrmica emesa pel sòl i absorbida per la coberta.

Pèrdues:

- 3) Transferència de calor per convecció, de la coberta a l'aire de dintre.
- 4) Transferència de calor per convecció de la coberta amb l'aire de l'atmosfera.
- 5) Radiació transmesa des de la coberta cap a l'atmosfera.
- 6) Radiació emesa per la coberta cap a l'interior.

4.2.2 Balanç de l'energia interior

Pèrdues:

- 1) Pèrdua per transferència per convecció de l'interior a la coberta.
- 2) Pèrdua per convecció de l'interior al terra
- 3) Pèrdues per renovacions.

4.2.3 Balanç de l'energia del sòl:

Guanys:

- 1) Radiacions solars absorbides pel terra.
- 2) Radiacions tèrmiques de la coberta

Pèrdues:

- 3) Pèrdua per la convecció amb la superfície interior.
- 4) Pèrdua per la conducció cap al subsòl .
- 5) Pèrdua per la radiació tèrmica emesa pel terra.

4.3 Equacions del model

4.3.1 Radiació

La intensitat de la radiació solar, al igual que la temperatura externa, són funcions que varien amb el temps i que hem de subministrar externament al programa. Encara que com no disposem de dades empíriques de la radiació solar incident, s'ha de calcular a partir d'una equació astronòmica donades la posició geogràfica de l'hivernacle i el dia de l'any. Per això necessitem calcular la declinació i l'altura solar, representades a la següent figura:

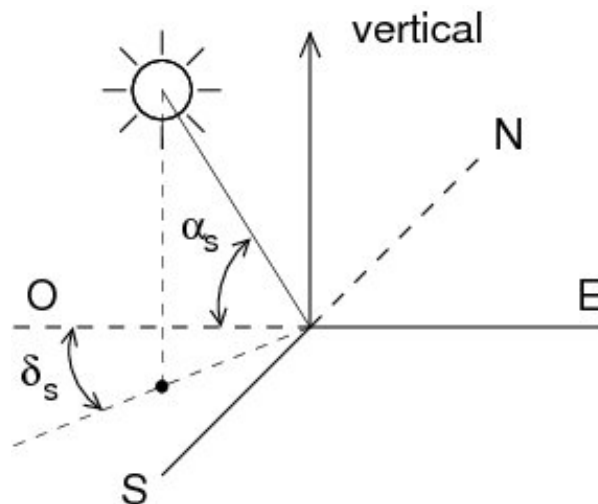


Figura 5 : Altitud i azimuth solar a l'hemisferi nord

$$\delta_s = 23,45^\circ \sin [2\pi (284 + n / 365)]$$

$$\sin \alpha_s = \sin \Phi \sin \delta_s + \cos \Phi \cos \omega$$

On Φ és la latitud i ω l'angle horari definit de manera que val zero al migdia solar. La radiació solar incident sobre una superfície horitzontal serà:

$$I = I_0 \sin \alpha_s$$

Essent I_0 la radiació provinent del sol que arriba a la superfície terrestre després de travessar l'atmosfera. També s'ha inclòs la possibilitat d'especificar l'hora de la sortida i la posta del sol per als casos en que la topografia modifiqui els valors teòrics.

Per a calcular els fluxos de calor per radiació han hagut de calcular les resistències creades entre aquests. A continuació es mostren les expressions que permeten calcular aquestes resistències (resistències entre sòl – interior, sòl-exterior, sòl- coberta i coberta-exterior) així com el diagrama de la xarxa de resistències tèrmiques :

$$R_s = 1 - \epsilon_s / A_s \epsilon_s, \quad R_{se} = 1 / A_s (1 - \epsilon_c), \quad R_{sc} = 1 / A_s F_{sc} \epsilon_c, \quad R_{ce} = 1 / A_c \epsilon_c$$

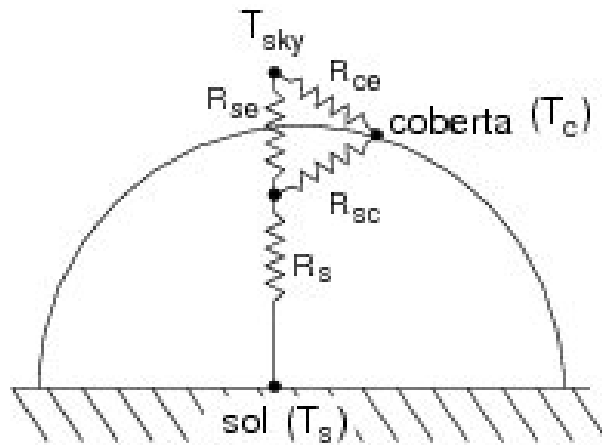


Figura 6: Model usat per a calcular els fluxos de radiació

Podem definir el terme Radiositat, com la radiació total que surt del sòl per unitat de temps i de superfície, essent la seva expressió matemàtica:

$$J_s = \frac{\sigma T_s^4 + R_s / R_{sc} \sigma T_c^4 + R_s / R_{se} \sigma T_{sky}^4}{1 + R_s / R_{se} + R_l / R_{sc}}$$

4.3.2 Temperatures de l'aire interior i de la coberta

Les equacions per a la T^a interior (1) i la coberta (2) seran, considerant que aquestes són uniformes:

$$\rho_a C_a V_a \partial T_a / \partial t = A_s h_{sa} (T_s - T_a) - (NRC_a / 3600) (T_a - T_e) + A_c h_{ca} (T_c - T_a)$$

(1)

$$\rho_c C_c V_c \partial T_c / \partial t = I A_c \alpha_c - A_c h_{ac} (T_a - T_c) - A_c h_{ce} (T_c - T_e) - (\sigma T_{sky}^4 - \sigma T_c^4) / R_{ce} - (T_c^4 J_s) / R_{sc}$$

(2)

4.3.3 Temperatura del sòl

Per al sòl s'ha utilitzat un model unidimensional, que s'ha discretitzat mitjançant un mètode pseudoespectral. El sòl té una profunditat d , a partir de la qual la temperatura es pot considerar constant (T_{ss}). En aquest estudi s'ha agafat $d = 0,2$ m ja que estem interessats en variacions de temperatura en una escala temporal de dies, i a aquesta profunditat la temperatura ja es manté constant. Haurem de resoldre doncs l'equació de difusió de la calor:

$$\partial T_s / \partial t = \kappa \partial^2 T_s / \partial Z^2$$

Amb les condicions de contorn:

$$T(z = -d) = T_{ss} \quad \partial_z T(z = 0) = q_s$$

$$q_s = I(1 - \Psi)\tau\alpha + h_{sa} A_s (T_s - T_{ss}) - \frac{(J_s - \sigma T_s^4)}{R_s}$$

On q_s és la calor absorbida pel sòl en unió del temps, i té en compte tant el guany degut a la radiació solar incident com els intercanvis per convecció amb l'aire interior i per radiació amb la coberta i el cel.

Un cop discretitzada l'equació per al sòl, obtenim un sistema d'equacions diferencials ordinàries per a la temperatura del sòl a diferents profunditats i per a les temperatures de l'aire interior i la coberta que es resòl utilitzant la funció ODE15s de Matlab, basat en un



integrador Runge-Kutta d'ordre 4. Així doncs el programa que executa el model matemàtic es composarà de diversos arxius, entre els quals podem citar els tres principals: “hiv“(annex 1) en el qual apareix el sistema d'equacions diferencials, “hiv run” (annex 2) que és qui donarà l'ordre a l'integrador per a resoldre el sistema I “cheb” (annex 3) que executa la discretització l'equació del sol.

5. PARÀMETRES

Els paràmetres que han estat introduïts al model es poden dividir en dos grups principals: aquells als que els hem donat un valor fix des d'un principi degut a que considerem que no afecten significativament a la predicció del model, i altres als que els hem assignat diferents valors per tal de veure com variaven les temperatures predites pel model:

5.1 Paràmetres de valor fix

5.1.1 Paràmetres ambientals

A continuació es mostra una taula on queden resumits els paràmetres ambientals que han estat introduïts al model:

PARÀMETRES AMBIENTALS	SÍMBOL	VALOR		UNITATS
		ESTIU	HIVERN	
Amplitud de la intensitat de la radiació solar	I	1200	1200	W/m ²
número de dies de l'any	data	270	360	d
Latitud	lat	43	43	°
Hora sortida del sol (real)	hs	11	11	h[0-24]
Hora posta del sol (real)	hp	19,5	16	h[0-24]
Retard horari	DT	2	2	h
T ^a constant del subsòl	Tss	20	6	°C
Concentració vapor d'aigua exterior	w_e	10	10	g/m ³
Període d'un dia	T	86400	86400	s
Constant d'Estefan-Boltzman	estefan	5.67 e x 10 ⁻⁸	5.67 e x 10 ⁻⁸	w/m ² k ⁴
Evapotranspiració	Psi	0	0	*

Taula 11 : Paràmetres ambientals de l'hivernacle

5.1.2 Paràmetres geomètriques

La següent taula presenta aquells paràmetres que componen la geometria de l'hivernacle:

PARÀMETRES GEOMÈTRICS	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Àrea sòl Hivernacle	A_s	40	m^2
Àrea coberta Hivernacle	A_c	80	m^2
Volum interior	V	90	m^3
Factor de forma sol-coberta	F_{sc}	1	[0-1]
Factor de forma coberta-sol	F_{cs}	0,5	[0-1]

Taula 12 : Paràmetres geomètrics de l'hivernacle.

5.1.3 Paràmetres de la coberta

Respecte la coberta, els dos principals paràmetres són l'Emissivitat d'IR i la Transmissivitat del visible, d'ambdós paràmetres se'n parla al següent apartat. A continuació es presenta la taula que conté la resta de paràmetres que s'han tingut en compte en la modelització:

PARÀMETRES COBERTA	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Capacitat calorífica	C_c	500	J / Kg K
Densitat	ρ_c	200	Kg/m ³
Gruix material de coberta	d_c	2×10^{-4}	m
Absorció visible	α_c	0,1	[0-1]

Taula 13 : Paràmetres de la coberta de l'hivernacle.

5.1.4 Paràmetres de l'aire

PARÀMETRES AIRE	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Capacitat calorífica	C_{p_a}	1000	J / Kg K
densitat	ρ_a	1,2	Kg / m ³

Taula 14 : Paràmetres de l'aire

5.1.5 Paràmetres del sòl

PARÀMETRE	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Discretització	N	9	-
Gruix sol	d_s	0,2	m
Capacitat calorífica	C_s	1000-1500 (Estiu)	J / Kg K
Densitat	ρ_s	1500-2000 (Hivern)	Kg / m ³
Emissivitat IR	ε_s	0,7	-
Absorció visible	κ_s	0,9	-
Difusivitat tèrmica	α_s	$k_s / (\rho_s * C_s)$	m ² /s

Taula 15 : Paràmetres del sòl de l'hivernacle

El sòl rebrà l'energia procedent de la radiació solar que travessa la coberta, augmentant així la seva temperatura. La magnitud d'aquest augment dependrà bàsicament per una banda de com li arriba la radiació, i per una altra de com l'absorbeixi. És en aquest segon punt on entren en joc tres paràmetres importants que són:

Conductivitat tèrmica

Aquest paràmetre indica la facilitat/dificultat del sòl per a transferir calor. El seu valor variarà depenent del tipus de sòl. Així, la conductivitat serà més elevada en sòls humits que secs, i més encara si l'aigua es troba en estat sòlid (gel). També serà més gran en sòls compactes (argilosos) que no pas en porosos (sorrencs), ja que l'aire actua com aïllant tèrmic. El contingut de Quars també augmenta aquest paràmetre, essent aquest constituent del granit, més abundant en sòls sorrencs.

Finalment, es va escollir el valor de $k_s = 1$ W/m per al cas de la temporada d'estiu i de $k_s = 0,2$ W/m per al d'hivern, seguint aquest valor no gaire alt, degut a que durant aquell temps el terra presentava una mena de crosta superior, pel fet de no haver-se treballat les terres, fet pel qual disminueix la capacitat del sòl per a conduir el calor.



Capacitat calorífica volumètrica (CCV)

És el canvi en el contingut calòric, per unitat de volum del sòl per unitat de canvi de temperatura. És a dir, la facilitat/dificultat que presentaria el sòl per escalfar-se.

Al contrari del que passa amb la conductivitat tèrmica, la capacitat calorífica serà més baixa en sòls secs i porosos, ja que es necessita més energia per a escalfar 1°C d'aigua que d'aire.

Aquest paràmetre es pot calcular mitjançant la fórmula de Vriens:

$$C = X_s C_s + X_w C_w + X_a C_a + X_o C_o$$

La C representa la capacitat calorífica volumètrica, els subíndex s, w, a i o corresponen als materials minerals, l'aigua, l'aire i la matèria orgànica que formen part del sòl, respectivament. La X representa la fracció volumètrica de cadascun d'aquests components. Cal tenir en compte:

$$\sum X_i = 1$$

El valor de la CCV de cada component, s'obté a partir del producte de la seva densitat pel calor específic corresponent.

També cal dir de que l'aire es sol depreciar. A continuació es mostra una taula de valors de diferents paràmetres per alguns dels principals components del sòl:

Material	Densitat (mg m^{-3})	Calor específic ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Conductivitat tèrmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Capacitat calorífica volumètrica ($\text{mJ m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Minerals del sòl	2,65	0,87	2,5	2,31
Granit	2,64	0,82	3	2,16
Quars	2,66	0,8	8,8	2,13
Vidre	2,71	0,84	0,8	2,28
Matèria orgànica	1,3	1,92	0,25	2,5
Aigua	1	4,18	$0,56 + 0,0018 \text{ T}$	4,18
Gel	0,92	$2,1 + 0,00737 \text{ T}$	$2,22 - 0,011 \text{ T}$	$1,93 + 0,0067 \text{ T}$
Aire (101 kPa)	($1,29 - 0,0041 \text{ T}$)	1,01	$0,024 + 0,0007 \text{ T}$	($1,3 - 0,0041 \text{ T}$) $\times 10^{-3}$

Taula 16 : valors de paràmetres per als principals components del sòl

Difusivitat tèrmica

Aquesta propietat tèrmica mesura la taxa de difusió de calor ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), i s'expressa com el quocient entre la conductivitat tèrmica i el producte de la capacitat calorífica per la densitat. La seva inversa és una mesura del temps de termalització requerit per la mostra.

5.2 Paràmetres d'estudi

Paràmetre	Símbol	Unitats
Temperatura Sky	T_{sky}^a	$^{\circ}\text{K}$
Transmitància de la coberta	τ_c	—
Emissivitat de coberta	ε_c	—
Coeficient de convecció extern	h_{ce}	$\text{W/m}^2\text{K}$
Coeficient de convecció intern	h_{ca}	$\text{W/m}^2\text{K}$
Coeficient de convecció del sòl	h_{sa}	$\text{W/m}^2\text{K}$

Taula 17: Llegenda dels paràmetres d'estudi

La funció del model és preveure les temperatures de coberta, de l'interior i del sòl de l'hivernacle amb la màxima fidelitat possible. Per això cal tenir en compte que a més dels paràmetres físics, n'hi ha d'altres que seran variables i que per tant haurem de veure com afecten al model per tal d'escollir aquells valors que millor reflecteixin la realitat. Aquests paràmetres seran:

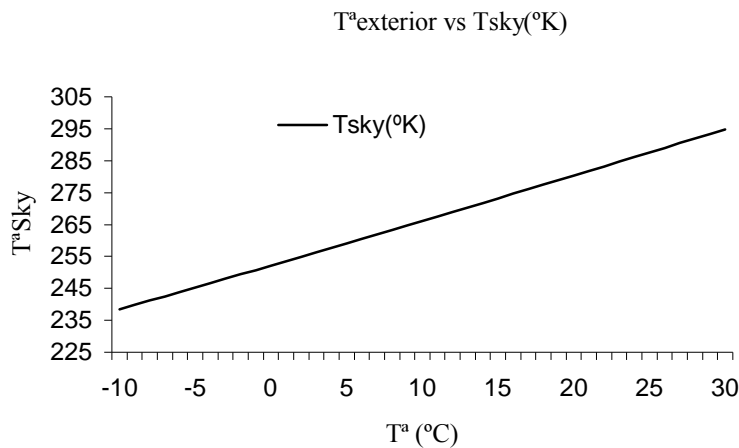
5.2.1 T^a sky

Es tracta d'una temperatura fictícia, introduïda per a modelar l'intercanvi de radiació tèrmica amb el cel, que es considera com un cos negre.

Per tal de veure com ens afecta al model, hem escollit diferents valors de T^asky de la gràfica 10, la qual s'ha representat agafant unes determinades temperatures mitges als mesos d'agost i desembre del 2006 i aplicant la següent fórmula ¹²:

$$T^{\text{a sky}} = 0,0559 \cdot T_{\text{am}}^{1.5}, \quad T_{\text{am}} = t^{\text{a}} \text{ ambiental en } ^{\circ}\text{K}$$

A continuació es mostra el gràfic que representa els valors de T^o sky en aplicar la fórmula anterior:



Gràfic 10 : Representació dels valors de T^asky segons diferents valors de temperatures (en ° C)

Per a provar el model, s'han escollit 3 temperatures de T^asky del gràfic 10: la que correspon a la màxima mitjana del mes d'agost (17°C), i després dues dels extrems, per tal de contrastar els efectes. En la següent taula es mostren els resultats:

T ^a Sky(°K)	T ^a Coberta(°C)	T ^a Aire (°C)	T ^a Sòl(°C)
250	33	33,7	35,2
276	33,8	36,6	42,4
295	34,5	39,3	48,9

Taula 18: Resultats del model de les temperatures de la coberta, interior i del sòl per a diferents valors de T^asky

De manera general, al augmentar la T sky augmenten les tres temperatures: En el cas de Tsky= 250°K, els resultats del model s'apropen més a les dades empíriques, allunyant-se més en els altres dos casos.

	UV	Visible	IRC	IRL	RSG
Polietilè (PE)	78-84	84-90	70-89	80	90
Polietilè tèrmic		90		20-40	90
PVC		72		90	
EVA (100 micres)		90		90	
Doble coberta (PE)				66	83

Taula 19 : Transmissió (%) de làmines de plàstic a diferents radiacions.



.2.2 a) Transmissió i b) Emissivitat de coberta

a) Transmissió

La Transmissió és la propietat que tenen els materials de deixar passar a través seu la radiació solar. S'expressaria com la relació entre la radiació a l'interior de l'hivernacle i la mesura simultània a l'exterior. La transmissió dependrà de l'angle d'incidència de la llum, (essent als matins i al fer-se de nit quan els rajos arriben de manera més obliqua, reduint així la transmissió degut a l'augment de la reflexió), així com del material de coberta:

IRC= radiació infraroja de curta longitud d'ona

ILC= radiació infraroja de llarga longitud d'ona

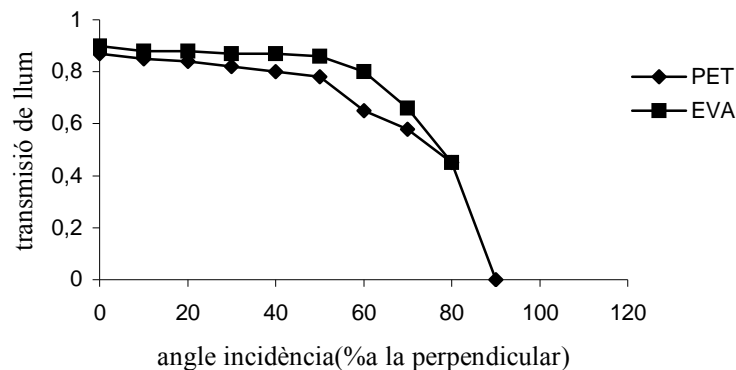
RSG= Radiació solar global

Tal i com ens mostra la taula 18, a diferència del vidre, tant el Polietilè com el plàstic EVA, presenten una certa transmissió per l'infraroig. Aquests efectes però, seran compensats per l'efecte de les gotes d'aigua condensades a les seves superfícies, augmentant així la seva opacitat.

El material de coberta de l'hivernacle és plàstic del tipus EVA (etilè amb vinil d'acetat). Aquest material es caracteritza per presentar una gran transmissió (propietat de deixar passar la radiació solar a través seu), així com a la vegada, una certa opacitat a la radiació infraroja (IR), evitant així les típiques inversions tèrmiques nocturnes dels hivernacles.

A continuació es presenta un gràfic comparatiu dels valors de transmissió, entre un plàstic EVA i un de polietilè tèrmic de baixa densitat:

Transmistància PET vs EVA



Gràfic 11 : Valors de Transmistància per a EVA i Polietilè segons l'angle d'incidència de la radiació solar.

Considerant un angle d'incidència del 50%, provarem el model amb un valor de transmistància de 0,85, 0,45 i 0,9 (amb $T^{\text{sky}} = 276$, mes d'agost). Els resultats es representen a continuació a la taula 19, observant-se clarament com augmenten totes les temperatures en augmentar la transmistància.

Transmistància	$T^{\text{a}}_{\text{coberta}}(^{\circ}\text{C})$	$T^{\text{a}}_{\text{aire interior}}(^{\circ}\text{C})$	$T^{\text{a}}_{\text{sòl}}(^{\circ}\text{C})$
0,45	34,00	32,00	26,00
0,85	34,00	33,00	36,00
0,90	35,00	33,00	38,00

Taula 20: Resultats del model per a diferents valors de transmistància

b) Emissivitat

El coeficient d'emissivitat determina la capacitat del cossos d'emetre la calor que absorbeixen en forma de radiació electromagnètica. Quanta més calor sigui un cos capaç d'absorbir, més gran serà el seu valor. Per tant es pot establir la següent relació:

$$\text{Transmissivitat} = 1 - \text{Absorbància} - \text{Reflexió}$$

Aquesta radiació emesa serà tant més intensa com més elevada sigui la temperatura de l'emissor. L'energia radiant emesa per un cos a temperatura ambient és escassa i correspon

a longituds d'ones superiors a les de la llum visible (és a dir, de menor freqüència). Al augmentar la temperatura no només augmenta l'energia emesa sinó que ho fa a longituds d'ona més curtes (és per aquest fet el motiu de que un cos canviï de color quan s'escalfa. Els cossos no emeten amb igual intensitat a totes les freqüències o longitud d'ona, sinó que segueixen la llei de Plank:

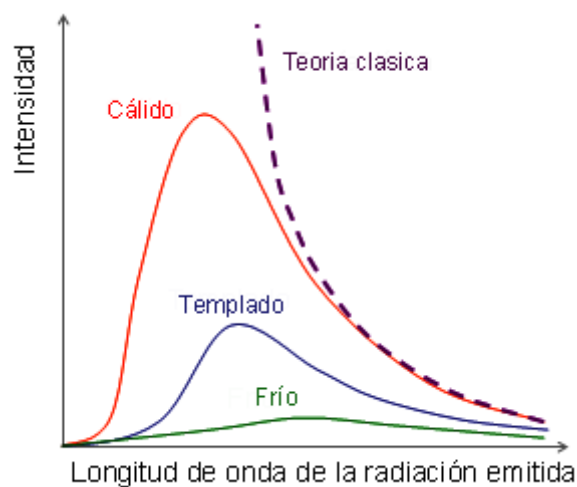
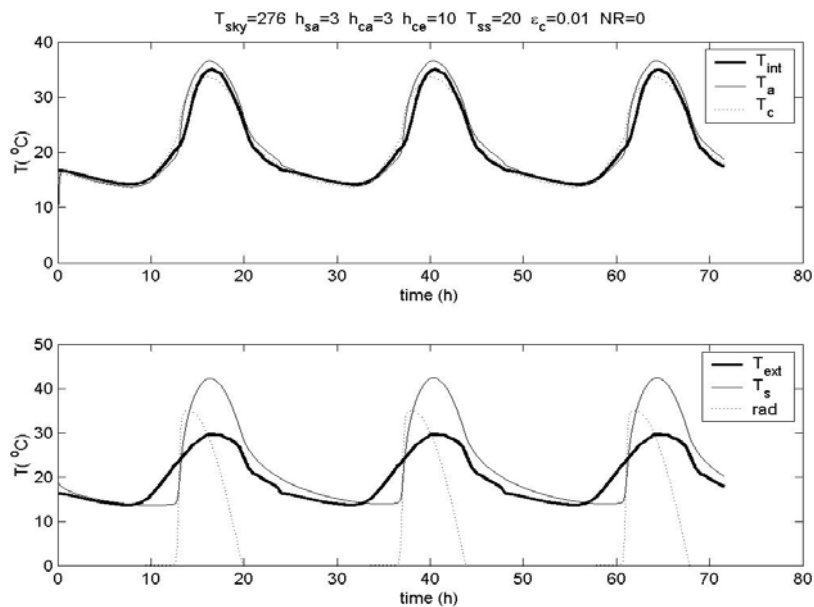


Figura 7: Emissió de cossos a diferents temperatures

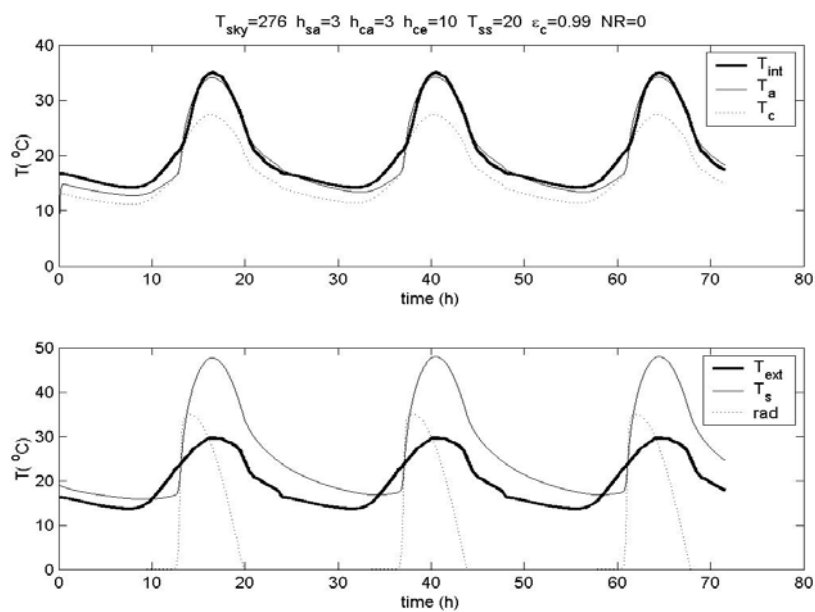
Respecte l'emissivitat de la coberta, en teoria hauríem d'agafar un valor més ben alt, ja que com s'ha comentat anteriorment, l'EVA en presenta una gran opacitat degut al contingut de Vinil d'Acetat i per tant la coberta absorbirà part de la radiació IR que li arriba de l'interior de l'hivernacle, per a emetre-la posteriorment en forma d'ones electromagnètiques. En aquest cas, el mecanisme de transferència d'energia predominant entre la coberta i l'exterior serà per tant la radiació.

S'han fet córrer uns casos amb el model per a veure la rellevància d'assignar un valor alt o baix a l'Emissivitat. Els dos primers pertanyen a dos casos d'estiu i els dos últims a hivern. En ambdós situacions s'ha contrasta un valor d'Emissivitat de 0,01 amb un altre de 0,99 (valors extrems). Els resultats obtinguts venen reflectits a les següents gràfiques on: T_{int} = temperatura interior empírica, T_a = temperatura interior estimada pel model, T_c = temperatura de la coberta, T_s = temperatura del sol estimada pel model, **rad** = radiació

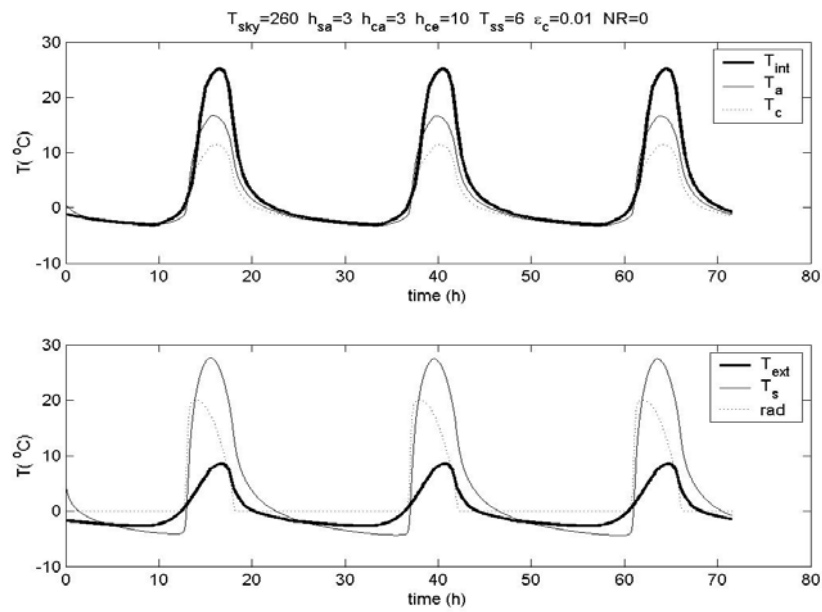
solar (cal dir que la radiació ve representada a través d'unes unitats arbitràries, ja que només apareix com una guia per a relacionar temperatures amb el moment del dia).



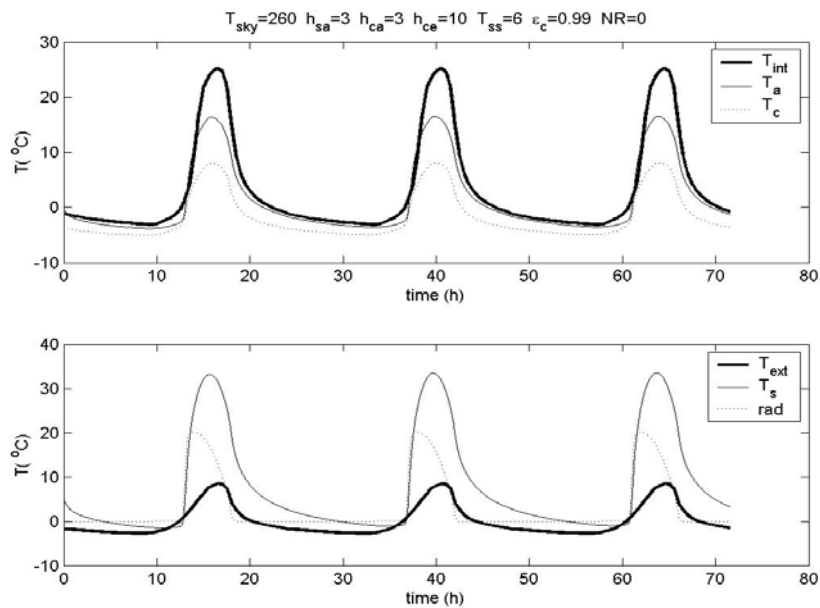
Gràfic 12: Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció i valor de 0,01 per a l'Emissivitat a l'estiu del 2006.



Gràfic 13: Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció i valor de 0,99 per a l'Emissivitat, a l'estiu del 2006.



Gràfic 14: Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció i valor de 0,01 per a l'Emissivitat a l'hivern del 2006.



Gràfic 15: Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per als coeficients de convecció i valor de 0,99 per a l'Emissivitat a l'hivern del 2006.

Com es pot observar als gràfics, de manera qualitativa, el paràmetre d'Emissivitat no ens afectarà gaire en la predicció de la temperatura interior, que en els dos casos extrems d'Emissivitat presenta el mateix valor. Un valor de 0,99 ens donarà uns valors molt baixos en la temperatura de coberta, degut a les grans pèrdues per radiació. Finalment, el valor que utilitzarem per a fer córrer casos amb el model, serà el de 0,01.

5.2.3 Coeficients de convecció

Per tal d'utilitzar uns valors o uns altres dels coeficients de convecció, serà important distingir entre convecció natural o lliure (el moviment del fluid és debut a forces ascensionals) i forçada (el moviment del fluid es troba reforçat per un treball mecànic com ventilació o agitació, per exemple).

També cal tenir en compte altres factors:

- a) Natura del fluid → en el nostre cas gasosa (ens referirem a l'aire).
- b) Règim de transferència del fluid → en particular el número de Reynolds
- c) Radi de curvatura i rugositat de la superfície → Nosaltres considerem la coberta de l'hivernacle plana i llisa.

El valor dels coeficients de convecció també variaran molt en funció de les diferències de temperatures i del grau d'humitat, malgrat que aquesta darrera la menysprearem.

-Coeficient de convecció extern $-h_{ce}$ - (W/m^2K):

Nombroses són les expressions empíriques que, mitjançant diferents paràmetres, ens permeten estimar un valor per al coeficient de convecció existent entre la coberta i l'aire exterior. Per al nostre cas en concret, hem fet servir l'expressió de l'autor Papadakis¹², la qual es compleix per als casos en que la temperatura de coberta és superior a la de l'aire exterior, essent així $T_c - T_{am} > 0$. A més, també es té en compte la velocitat del vent (V_w)

exterior, el qual afavoreix la circulació de l'aire, provocant així un corrent de convecció el qual podríem catalogar de forçada, encara que d'una manera suavitzada, degut a les baixes velocitats amb les que ens trobem ($V_w < 6.3 \text{ m/s}$):

$$h_{ce} = 0.95 + 6.76 V_w^{0.4}$$

Aplicant aquesta fórmula per a diferents velocitats de vent, s'han obtingut els següents resultats:

$V_w \text{ (m/s)}$	0	1	2	3	4	5	6
$h_{ce} \text{ (W/m}^2\text{K)}$	0.95	7.71	10.44	12.53	14.28	15.82	17.21

Taula 21 : valors de h_{ce} a diferents velocitats del vent

A l'hora d'aplicar el model, agafarem un valor de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, que equival a una velocitat de vent de 2 m/s .

-Coeficient de convecció intern $-h_{ca}- \text{ (W/m}^2\text{K)}$:

De cara al càlcul del coeficient de convecció entre la coberta i l'aire interior, és important determinar si es tracta d'un cas de convecció natural o forçada. Segons el criteri de l'autor Monteith la convecció lliure té lloc quan $Gr/Re^2 > 16$, la purament forçada té lloc quan $Gr/Re^2 < 0.1$ i si aquesta relació pren un valor intermig ($0.1 < Gr/Re^2 < 16$), té lloc un procés de convecció mixta. En el nostre cas, existeix una expressió empírica¹³ que ens permetrà calcular el valor del coeficient de convecció, tot i considerant finalment, que ens trobem en un cas de convecció mixta (el moviment de l'aire de l'interior de l'hivernacle es veurà afavorit, de tant en tant, pel vent provinent de les renovacions):

$$h_{ca} = 1.95(T_c - T_a)^{0.3}; (T_c - T_a) < 11.1^\circ\text{C}$$

Alhora d'aplicar aquesta fórmula, s'obtingueren els següents resultats:

$T_c - T_a (^{\circ}\text{C})$	1	2	3	4	5	6
$h_{ca} (\text{W/m}^2\text{K})$	1.95	2.40	2.71	2.96	3.16	3.34

Taula 22 : valors de h_{is} segons diferents valors de la diferència $T_c - T_a$

Quan apliquem el model, agafarem el valor de 2.71 com a valor de referència (per simplificar, utilitzem 3).

-Coeficient de convecció del sol $-h_{sa}$ ($\text{W/m}^2\text{K}$):

La equació per a estimar el valor d'aquest coeficient de convecció entre el sol i l'aire interior considera, com en el cas anterior, un cas de convecció mixta¹⁴:

$$h_{sa} = 1.52(T_s - T_a)^{0.33} + 5.2(u/L)^{0.5}$$

On:

“ T_s ” és la temperatura del sol, on agafarem el valor de 20°C (ve a ésser la mitjana diària).

“ U ” és la velocitat mitja del vent a l'interior de l'hivernacle. Agafarem el mateix valor que en aquest article, que és 0.1 m/s .

“ L ” és la longitud característica de l'hivernacle, per a la qual donem un valor de 7 metres de diàmetre.

Com a valor de la temperatura de l'aire interior agafem 17°C , que correspon a la mitjana de la temperatura interior a dins de l'hivernacle el dia 31/08/2006.

Aplicant la fórmula abans esmentada, obtenim un valor $=2.8$ (simplificarem a 3) que farem servir de referència.

6. APLICACIÓ DEL MODEL: RESULTATS I DISCUSSIÓ

En aquest apartat s'aplicarà el model per tal de veure com afecten les variacions dels diferents paràmetres d'estudi a les temperatures dels diferents components de l'hivernacle, tot i començant pel cas d'estiu.

6.1 Estudi dels Coeficients de convecció durant l'estiu del 2006

Com hem vist anteriorment, la calor bescanviada per convecció pot ésser calculada mitjançant l'equació :

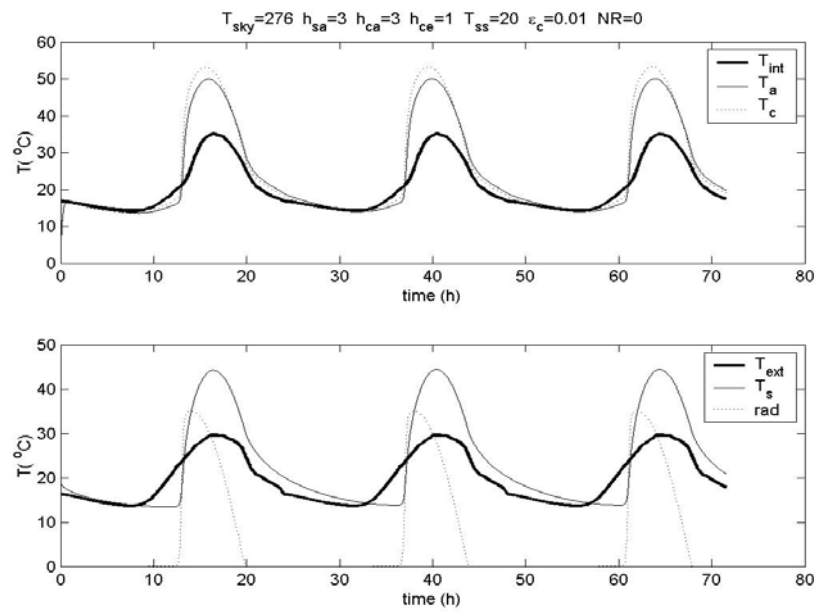
$$Q = h A (T_1 - T_2)$$

On “ h “ representa el coeficient de convecció expressat en les unitats W/m^2K , i “ A “ l'ària que travessa el flux calorífic.

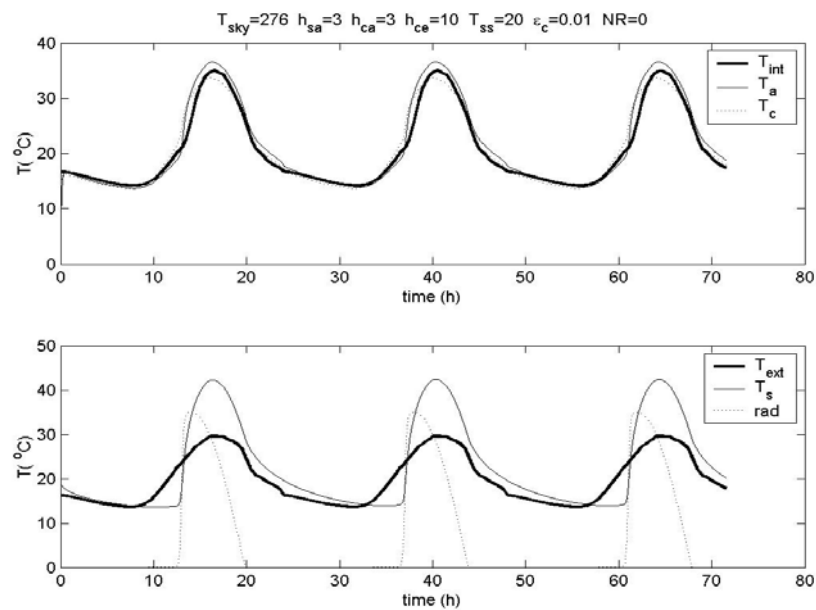
Per tal de veure com el valor d'aquest paràmetre influeix en l'estimació de les temperatures per part del programa, hem agafat diferents valors de coeficient tot i fent subgrups segons es tractés de convecció natural o forçada, i segons entre quins elements tingués lloc aquest intercanvi.

6.1.1 Coeficient de convecció coberta- aire exterior (h_{ce})

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció extern per a introduir al programades des de 1 fins a 10 W/m^2K . També s'ha de tenir en compte que en tots els casos s'ha utilitzat com a valor d'emissivitat de coberta 0,01, encara que en tractar-se de plàstics EVA, seria més real un valor més elevat. El dia per al qual s'ha fet servir el model presenta una temperatura màxima externa de 29,6 °C i una mínima de 13,6°C. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 1 i 10 W/m^2K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:



Gràfic 16 : Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per a h_{ca} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ce} = 1$, a l'estiu del 2006.

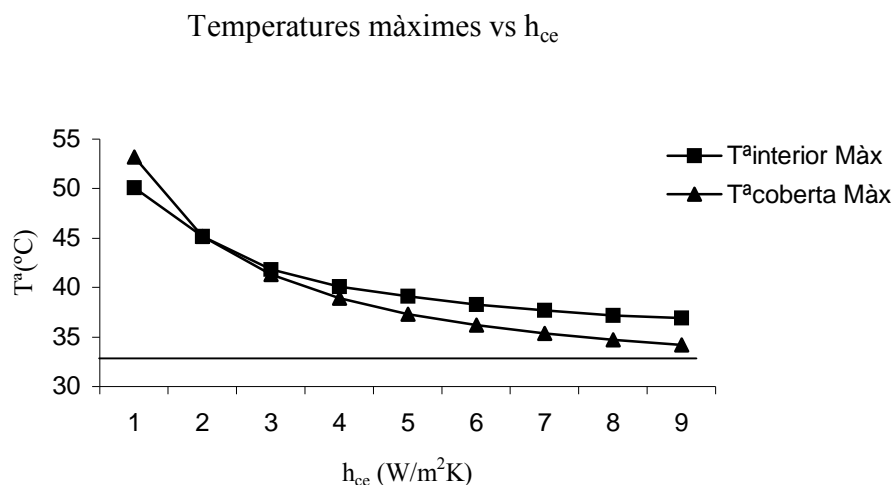


Gràfic 17 : resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per al h_{ca} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ce} = 10$, a l'estiu del 2006.

Les corbes de temperatures interiors empíriques i predites, presenten un major grau de solapament, quant més gran és el coeficient de convecció, al disminuir el valor de la temperatura interior predita

La corba que representa a la predicció de la temperatura interior, es solapa força bé amb la corresponent a les dades empíriques (gràfic 16), exceptuant la zona corresponent a la franja horària de 10 a 15 h, on ambdues corbes es troben significativament desplaçades (trobant-se la corba de la predicció, per sota de la empírica), degut a que el model no contempla l'efecte de la sortida gradual del sol. Aquest fet estarà present per a la resta de casos.

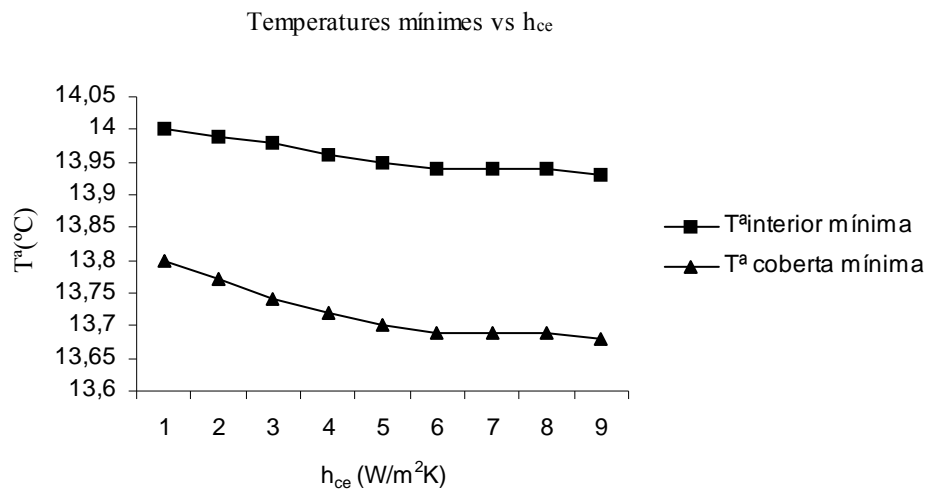
També podem veure la tendència dels valors de les temperatures, on la línia llisa discontinua indica la temperatura màxima (33,33°C) o mínima (8,6°C) empírica de l'interior:



Gràfic 18 : valors de la temperatura màxima interior i de coberta donats pel model per a diferents h_{ce} , mantenint h_{ca} i h_{sa} els seus valors de referència , a l'estiu del 2006.

Pel que fa a les temperatures màximes, els gràfics reflecteixen una clara tendència de disminució de la temperatura de coberta, i per tant també interna, a mesura que augmenta el valor del coeficient de convecció. Es pot apreciar la gran diferència dels resultats entre un valor de 1 W/m²K (gairebé no es considera convecció), on les temperatures de l'interior i de la coberta arriben fins i tot a superar els 50 °C i un altre de 10 W/m²K amb el

que les temperatures arriben a disminuir fins a uns 17 °C-20°C mostrant una gran sensibilitat al canvi de valor del coeficient i apropant-se més a les dades empíriques (la temperatura interior màxima empírica és de 33°C). Veure com la coberta perd calor amb gran velocitat, arribant de seguida a unes temperatures inferiors a les de l'interior. Existeix un valor de coeficient de convecció extern, a partir del qual, els valors de la temperatura de coberta i la predicció de l'interior ja no variaran. Aquest fet es produirà quan la temperatura de l'exterior i de la de coberta s'igualin, degut a que ja no existirà intercanvi de calor entre elles.



Gràfic 19: valors de la temperatura mínima interior i de coberta donats pel model per a diferents h_{ce} , mantenint h_{ca} i h_{sol} els seus valors de referència, a l'estiu del 2006.

En el cas de les temperatures mínimes (gràfic19) s'observen unes disminucions de temperatures molt poc apreciables, i gairebé la temperatura es manté constant en variar el coeficient de convecció extern. Destaca només la lleugera variació de passar d'un coeficient d'1 W/m²K a un altre de 5 W/m²K.

El fet de que les temperatures variïn tan poc, és degut a que a la nit el fenomen d'intercanvi de calor predominant no és la convecció sinó la radiació, i per tant aquest paràmetre h_{ce} , no ens influenciarà gaire. Entre coeficients de valors baixos es noten més les diferències, degut a que les pèrdues nocturnes de calor de la superfície de la coberta són directament proporcionals a la seva temperatura, i aquesta serà menor quant més alt hagi estat el valor del coeficient de convecció extern. De totes maneres, en aquest cas d'estiu

les temperatures de la coberta a la nit són força similars a les de l'exterior (veure gràfic 17 per exemple), romanent així en equilibri.

Els fets observats en els gràfics anteriors, venen corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

$h_{ce} (W/m^2 K)$	$T^{a}_{int} màx(^{\circ}C)$	$T^{a}_{coberta} màx(^{\circ}C)$	$T^{a}_{int} mín(^{\circ}C)$	$T^{a}_{coberta} mín(^{\circ}C)$
1	50,10	53,20	14,00	13,8
2	45,20	45,20	13,99	13,77
3	41,80	41,30	13,98	13,74
4	40,10	38,90	13,96	13,72
5	39,10	37,30	13,95	13,70
6	38,30	36,20	13,94	13,69
7	37,70	35,35	13,94	13,69
8	37,20	34,70	13,94	13,69
9	36,90	34,20	13,93	13,68
10	36,60	33,80	13,93	13,68

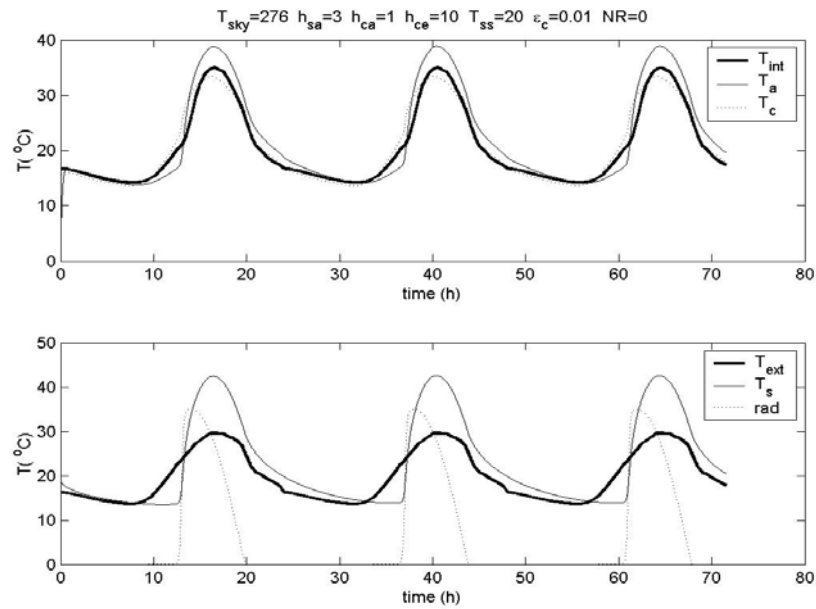
Taula 23: Resultats del model segons diferents valors de h_{ce}

Per tant, en el cas del coeficient de convecció extern, s'observa un flux de temperatures ascendent de l'interior a l'exterior de l'hivernacle, conduït per les pèrdues energètiques de la coberta.

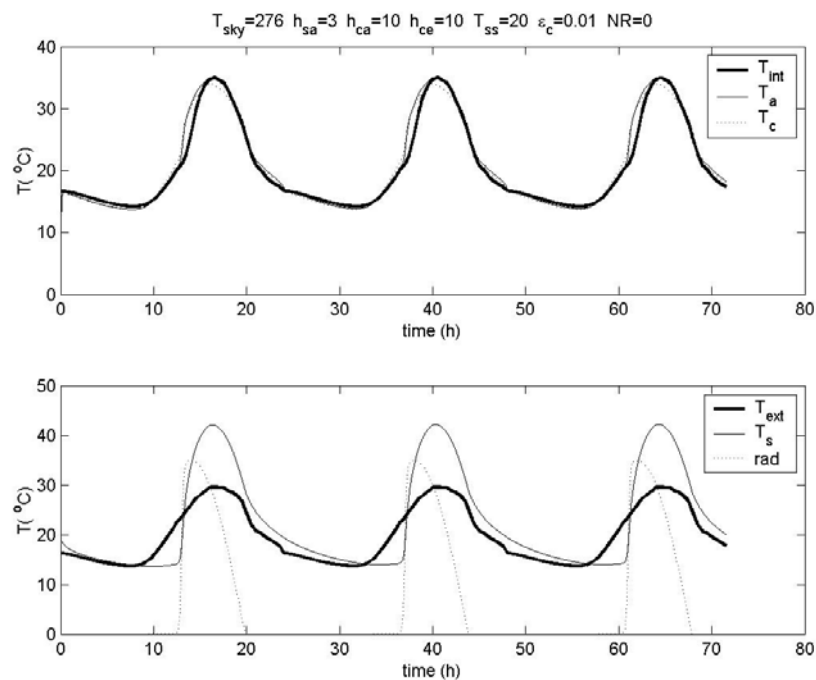
6.1.2 Coeficient de convecció coberta - aire interior (h_{ca})

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció intern per a introduir al programa de 1 fins a $10 W/m^2 K$. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sol, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als

valors de 1 i 10 $\text{W/m}^2\text{K}$ per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:



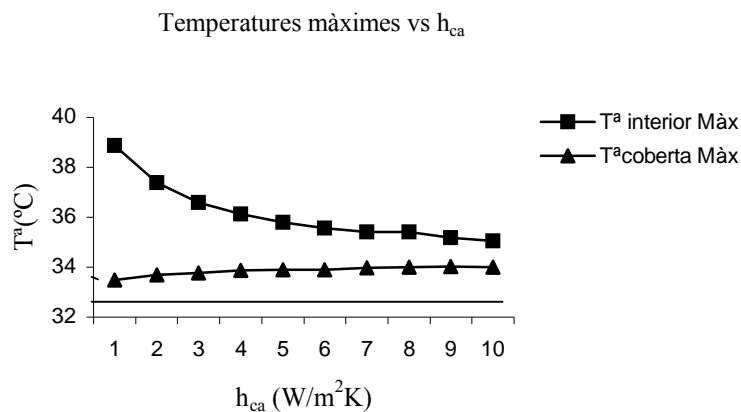
Gràfic 20 : Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ce} i h_{sa}, i amb valor de h_{ca} = 1, a l'estiu del 2006.



Gràfic 21 : Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ce} i h_{sa}, i amb valor de h_{ca} = 10, a l'estiu del 2006.

Els gràfics senyalen cap a la mateixa tendència del cas anterior, les corbes de temperatures interiors empíriques i predites, presenten un major grau de solapament, quant més gran és el coeficient de convecció, al disminuir la temperatura interior predita.

A continuació es mostraran els gràfics que mostren la tendència de la evolució de les temperatures:

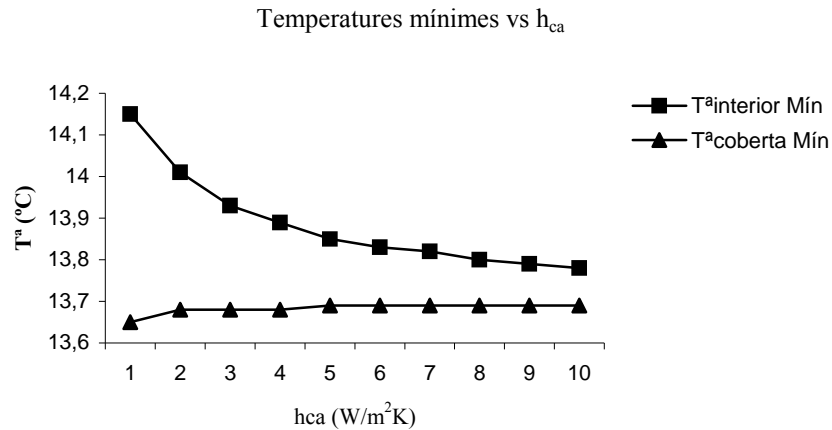


Gràfic 22 : valors de la temperatura màxima interior i de coberta donats pel model per a diferents h_{ca} , mantenint h_{ce} i h_{sa} els seus valors de referència , a l' estiu del 2006.

Com en el cas anterior, a mesura que augmenta el coeficient de convecció disminueix la temperatura interior màxima. La temperatura de l'interior tendeix a disminuir ja que la coberta es refreda degut a l'intercanvi de calor amb l'exterior i per tant aquesta no transmetrà calor cap a l'interior. En aquest cas però, la temperatura de coberta no disminueix sinó que arriba a experimentar un augment de fins 0,5 °C. Això indica un flux convectiu durant el dia, tal i que l'aire de l'interior, que es va escalfant durant el dia degut a la radiació transmesa directa o indirectament escalfa la coberta, tot i refredant-se, augmentant la seva densitat per a descendir i tornar a escalfar-se i així successivament.

Per al cas de les temperatures mínimes (gràfic 23) , la tendència és la mateixa i la temperatura interior tendeix a disminuir en augmentar el coeficient de convecció, mentre que la temperatura de la coberta es mantindrà constant en gran mesura. Aquest fet és

possible degut al gradient de temperatures que és descendent de l'interior cap a fora, sent doncs, la temperatura interior superior a la de la coberta, i aquesta darrera acabarà igualant-se a la de l'exterior pràcticament amb un valor de h_{ca} de 5-6 W/m^2K , no variant així la seva temperatura més al continuar augmentant el coeficient de convecció.



Gràfic 23 : valors de la temperatura mínima interior i de coberta donats pel model per a diferents h_{ca} , mantenint h_{ce} i h_{sa} , els seus valors de referència, a l'estiu del 2006.

Els fets observats en els gràfics anteriors, ve corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

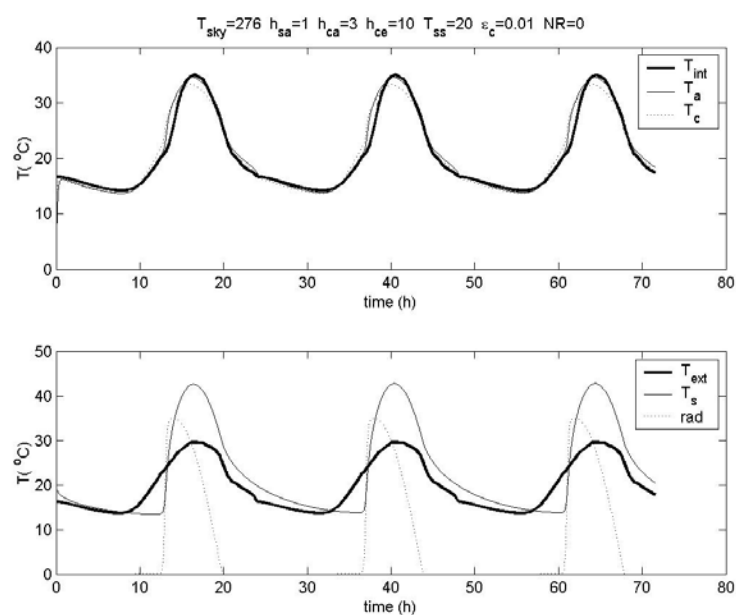
h_{ca} (W/m ² K)	T ^a int màx(°C)	T ^a coberta màx(°C)	T ^a int mín(°C)	T ^a coberta mín(°C)
1	38,87	33,50	14,15	13,65
2	37,38	33,68	14,01	13,68
3	36,6	33,78	13,93	13,68
4	36,13	33,87	13,89	13,68
5	35,80	33,90	13,85	13,69
6	35,56	33,91	13,83	13,69
7	35,40	33,97	13,82	13,69
8	35,40	34,00	13,80	13,69
9	35,17	34,02	13,79	13,69
10	35,05	34,0	13,78	13,69

Taula 24: Resultats del model segons diferents valors de h_{ca}

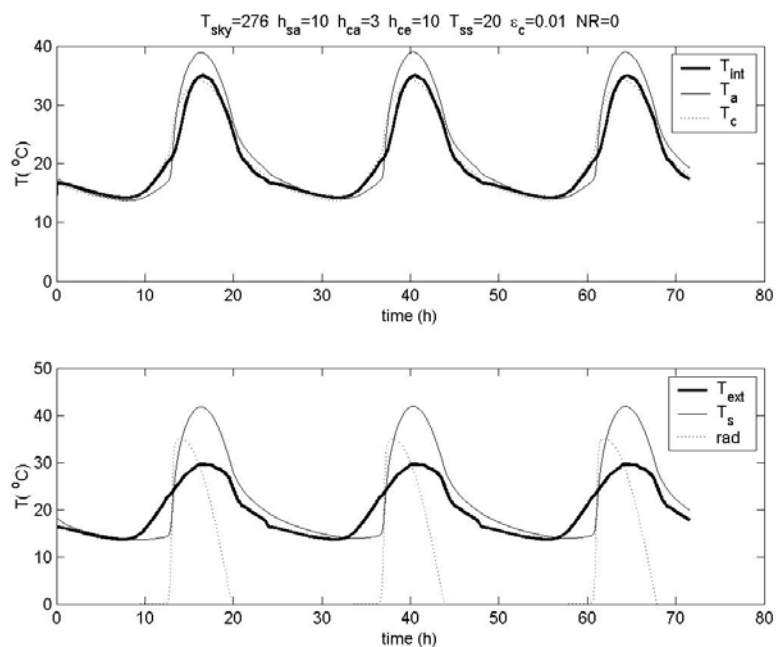
Així, les tendències de temperatures derivades de la variació del coeficient interior entre l'interior i la coberta indiquen un flux calorífic de l'interior cap a la coberta.

6.1.3 Coeficient de convecció sòl - aire interior (h_{sa})

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció sòl - interior per a introduir al programa de 1 fins a 10 W/m²K. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 1 i 10 W/m²K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:

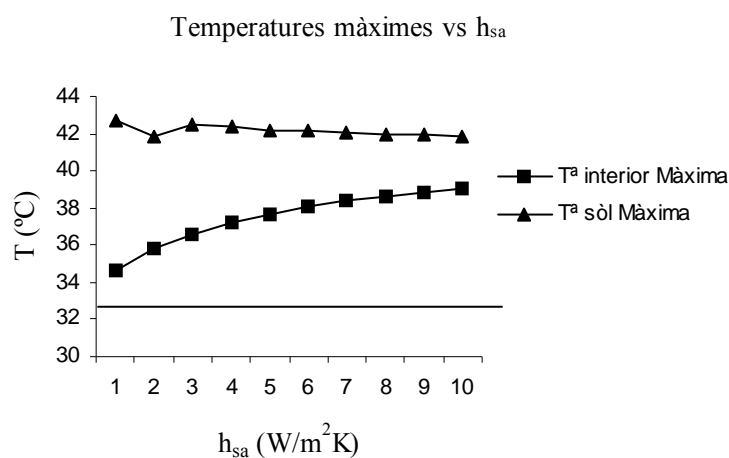


Gràfic 24 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ce} i h_{ca} , i amb valor de $h_{sa} = 1$, a l'estiu del 2006.



Gràfic 25 : Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ce} i h_{ca} , i amb valor de $h_{sa} = 10$, a l'estiu del 2006.

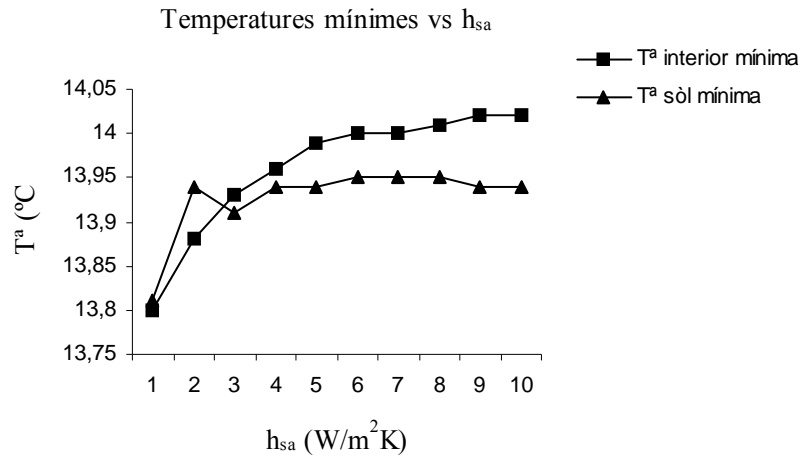
En aquest cas, quant més gran és el valor que pren el coeficient de convecció, augmenten les temperatures interiors predites tot i apropant-se més el valor al de les empíriques. Aquest fet explica el fenomen de transferència de calor del sòl cap a l'aire de l'interior, fent que quant major sigui el coeficient de convecció, més s'escalfi l'interior, mentre que la temperatura del sòl es manté gairebé constant. Aquest fet s'observa clarament en veure gràficament les tendències de les temperatures:



Gràfic 26: valors de la temperatura màxima interior i del sòl donats pel model per a diferents h_{sa} , mantenint h_{ce} i h_{ca} , els seus valors de referència, a l'estiu del 2006.

Pot observar-se la tendència ascendent de la temperatura interior en augmentar el valor del coeficient de convecció, així com el fet de que la temperatura del sòl es manté pràcticament constant, degut a que en tractar-se d'una massa relativament elevada, posseeix una gran inèrcia tèrmica, lo que implica que durant el dia és poc sensible a les pèrdues per convecció amb l'aire de l'interior. Aquesta mateixa inèrcia tèrmica farà que durant la nit (gràfic 27) el sòl transmeti calor de manera que li costarà així i encara refredar-se (s'observa una tendència ascendent en els valors de la temperatura del sòl en augmentar el valor del coeficient de convecció fins al valor de 2 W/m²K, on comença a estabilitzar-se.) , a l'aire interior sobretot mitjançant el fenomen de radiació, fent que aquesta augmenti. Aquest augment de la temperatura de l'aire interior és sobretot evident per a valors de 1-4 W/m²K en el coeficient de convecció, per a valors més alts, les diferències disminueixen, en tant que ho fa la diferència de temperatures entre el sòl i

l'interior de l'hivernacle. Poden observar-se aquest fet mitjançant la representació gràfica de la tendència de les temperatures interiors i del sòl mínimes:



Gràfic 27: valors de la temperatura mínima interior i del sòl donats pel model per a diferents h_{sa} , mantenint h_{ce} i h_{ca} , els seus valors de referència, a l'estiu del 2006.

Els fets observats en els gràfics anteriors, ve corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

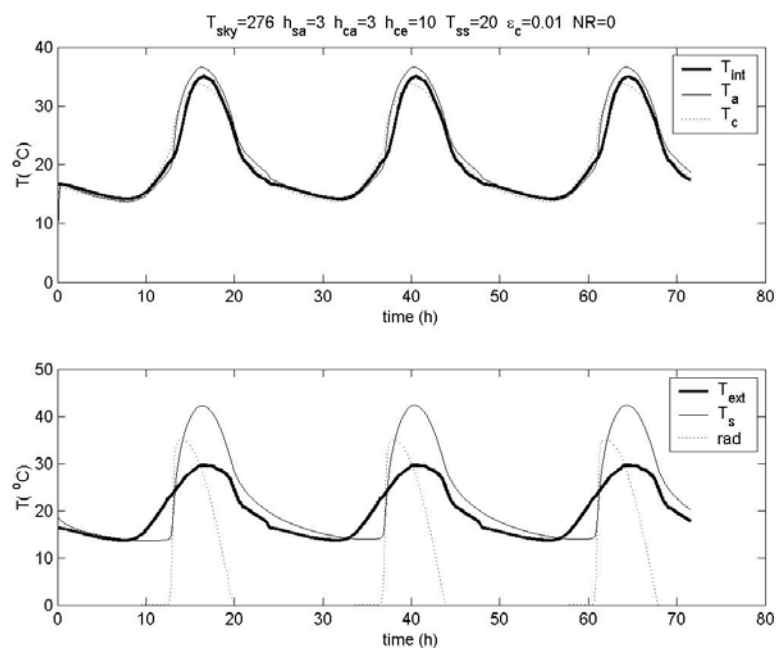
H_{sa} (W/m ² K)	Tªint màx (°C)	Tª Sòl màx(°C)	Tªint mín (°C)	Sòl mín (°C)
1	34,64	42,76	13,80	13,81
2	35,78	41,84	13,88	13,94
3	36,61	42,52	13,93	13,91
4	37,21	42,35	13,96	13,94
5	37,68	42,22	13,99	13,94
6	38,05	42,12	14,00	13,95
7	38,36	42,04	14,00	13,95
8	38,60	41,98	14,01	13,95
9	38,82	41,92	14,02	13,94
10	39,00	41,88	14,02	13,94

Taula 25: Resultats del model segons diferents valors de h_{sa}

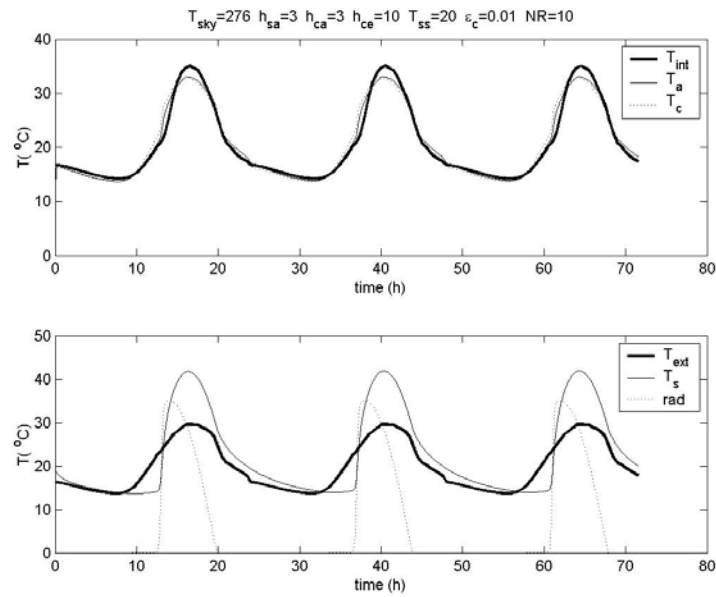
El sol actuarà com un acumulador d'energia durant el dia (escalfant l'aire interior i transmetent també calor cap a capes més profundes mitjançant el fenomen de conducció), mentre que per la nit tindrà efecte esmorteïdor, tot i recuperant calor dels altres horitzons més profunds, degut al gradient tèrmic entre el sol i l'interior de l'hivernacle.

6.1.4 Número de renovacions per hora (NR)

En aquest cas, els valors a introduir t aniran des de 0 fins al $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sol, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 0 i $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:

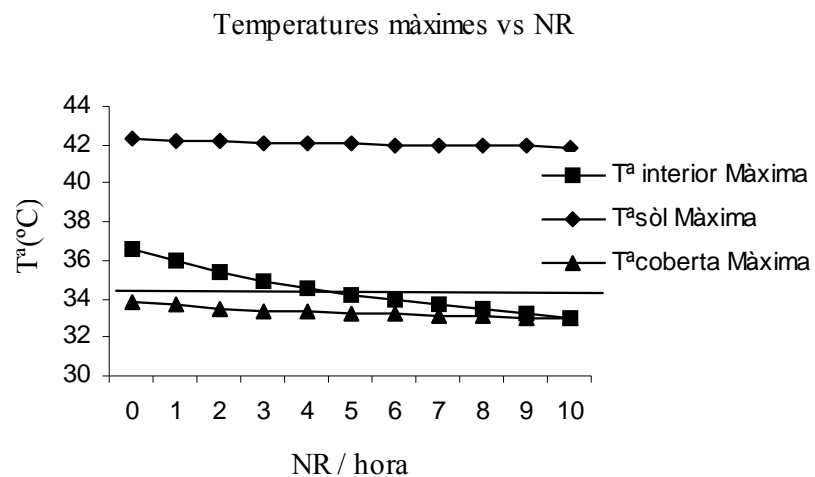


Gràfic 28 : Resultat del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció, i un $NR = 0$, a l'estiu del 2006.



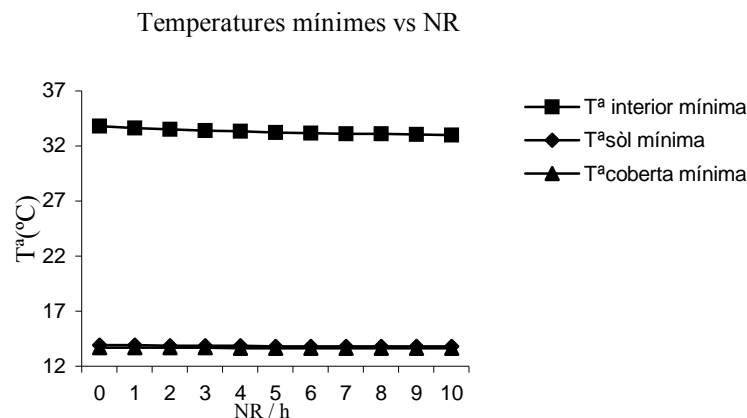
Gràfic 29 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció, i un $NR = 10$, a l'estiu del 2006.

A continuació es mostrarà la figura que representa l'evolució de les temperatures màximes de la coberta, l'interior i el sòl de l'hivernacle en funció del NR/h :



Gràfic 30 : valors de la temperatura màxima interior, del sòl i de la coberta donats pel model per a diferent nombre de renovacions, per als valors de referència dels diferents coeficients de convecció , a l'estiu del 2006.

Per al cas de les temperatures màximes, s'observa poca variació en el cas de les temperatures del sol (podrien considerar-se com estables) i de coberta, mentre que es mostra més sensible al canvi, la temperatura interior, tot i disminuint el seu valor, a mesura que augmenta el número de renovacions. Ja s'ha vist anteriorment com la temperatura de coberta depèn més directament de l'intercanvi amb l'exterior, i que el sol perd temperatura molt poc a poc degut a la seva inèrcia tèrmica.



Gràfic 31: valors de la temperatura mínima interior, del sol i de la coberta donats pel model per a diferent nombre de renovacions, per als valors de referència dels diferents coeficients de convecció a l'estiu del 2006.

Respecte les temperatures mínimes, només la temperatura interior presenta la disminució d'algunes centèsimes, encara que es podrien menysprear (els perfils de temperatures de sol i coberta es troben solapats), degut a la semblança entre les temperatures dels diferents components de l'hivernacle i l'exterior (13,6°C).

Els fets observats en els gràfics anteriors, ve corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

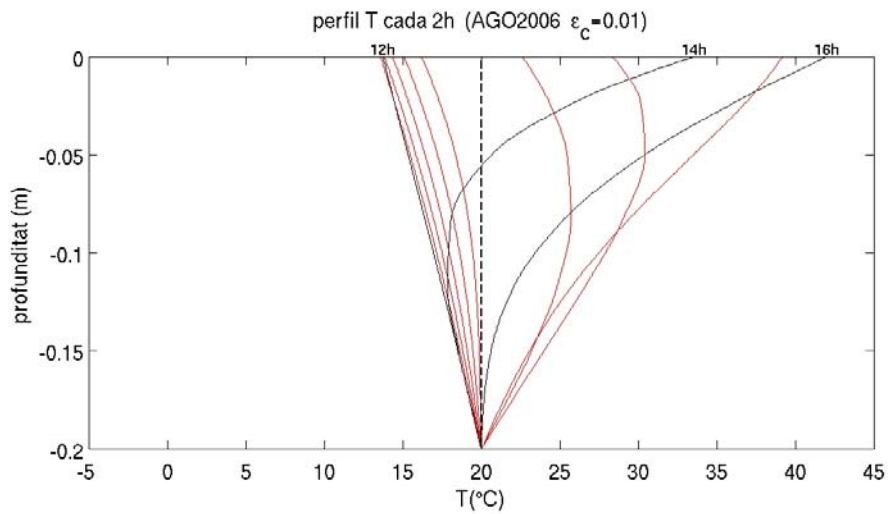
NR	T ^a int Màx(°C)	Sòl Màx(°C)	T ^a cob Màx(°C)	T ^a int Mín(°C)	Sòl Mín(°C)	T ^a Cob Mín(°C)
0	36,60	42,35	33,78	13,93	13,94	13,68
1	35,94	42,26	33,65	13,90	13,94	13,67
2	35,40	42,20	33,52	13,88	13,94	13,66
3	34,94	42,13	33,40	13,87	13,94	13,66
4	34,55	42,08	33,31	13,84	13,95	13,65
5	34,21	42,03	33,24	13,83	13,94	13,65
6	33,92	42,00	33,19	13,82	13,94	13,65
7	33,66	42,00	33,12	13,80	13,95	13,64
8	33,42	41,93	33,10	13,80	13,95	13,64
9	33,24	41,91	33,02	13,79	13,95	13,64
10	33,04	41,88	32,99	13,78	13,95	13,63

Taula 26: Resultats del model segons diferents valors de NR

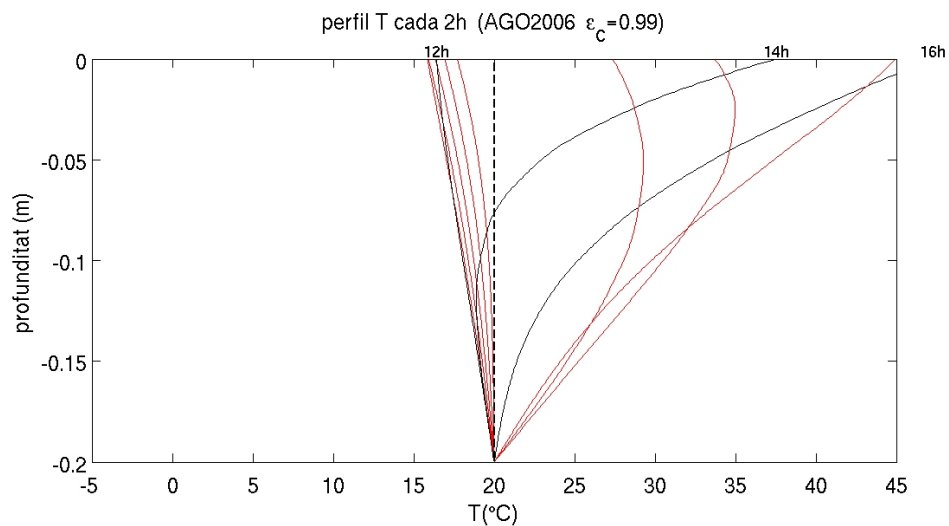
S'ha vist que el paràmetre de número de renovacions doncs, afecta només a la temperatura interior i durant el dia, fent que aquesta disminueixi en augmentar la renovació de l'aire, ja que durant el dia, la temperatura de l'aire interior és significativament més elevada que la de l'exterior.

6.1.5 Perfil de temperatures del subsòl

A continuació es presenten dues figures en les que es representen els perfils de la temperatura del subsòl des de la superfície fins a una profunditat de 20cm en períodes de dues hores, per a dos casos diferent, cas en que l'emissivitat de coberta pren el valor de 0,01 i per al que pren un valor de 0,99:



Gràfic 32 : Perfil de temperatures del subsòl a diferents profunditats , per a una Emissivitat de 0,01 a l'estiu del 2006.



Gràfic 33 : Perfil de temperatures del subsòl a diferents profunditats , per a una Emissivitat de 0,99 a l'estiu del 2006.

Ambdues figures presenten el mateix comportament: Cap a les dotze del migdia ens trobem un comportament gairebé lineal i amb pendent negatiu de la variació de temperatura del subsòl, lo que indica un escalfament progressiu de la superfície cap en dins degut al fenomen de conducció. Arribarem fins a una temperatura de 20 °C, que ha sigut escollida com la temperatura de referència del subsòl. A les 14:00h i a les 16:00 pot observar-se com la temperatura de la superfície és superior a la de les capes més profundes, havent augmentat aquesta de manera exponencial en relació a la profunditat (de manera inversa). A partir de les 18:00h la tendència s'inverteix, primer de manera gairebé lineal, i les temperatures van disminuint, sent les capes més superficials les de major temperatura. Destaca la forma de les corbes corresponents al perfil de temperatura a les 20:00h i 22:00h, la qual indica un comportament no lineal en el decreixement de les temperatures, sinó que s'observa un cert retard sobretot en les capes més superficials i fins aproximadament els 15 cm de profunditat, on zones properes a la superfície es troben més calentes que les que estan per sobre.

Per apreciar les diferències entre els dos casos, es presenten a continuació els valors numèrics de les temperatures (°C) en aquestes dues situacions predites pel model:

Estiu 2006 ; $\epsilon = 0,99$	T ^a sòl (°C)	T ^a interior(°C)	T ^a coberta(°C)
Temperatures màximes	48,00	34,00	27,00
Temperatures mínimes	16,00	13,00	11,00

Taula 27 : resultats del model per a una emissivitat de 0, 99, mantenint els valors de referència per als coeficients de convecció, a l'estiu 2006.

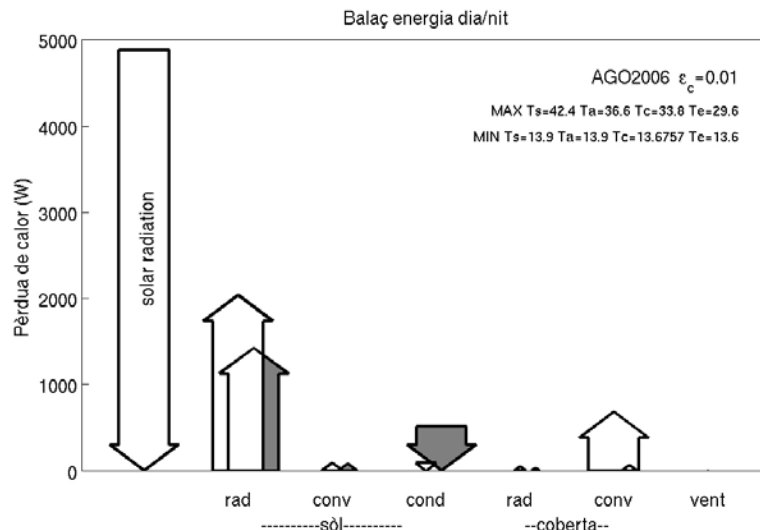
Estiu 2006 ; $\epsilon = 0,01$	T ^a sòl(°C)	T ^a interior(°C)	T ^a coberta(°C)
Temperatures màximes	42,00	37,00	34,00
Temperatures mínimes	14,00	14,00	14,00

Taula 28 : resultats del model per a una emissivitat de 0, 01, mantenint els valors de referència per als coeficients de convecció, a l'estiu 2006.

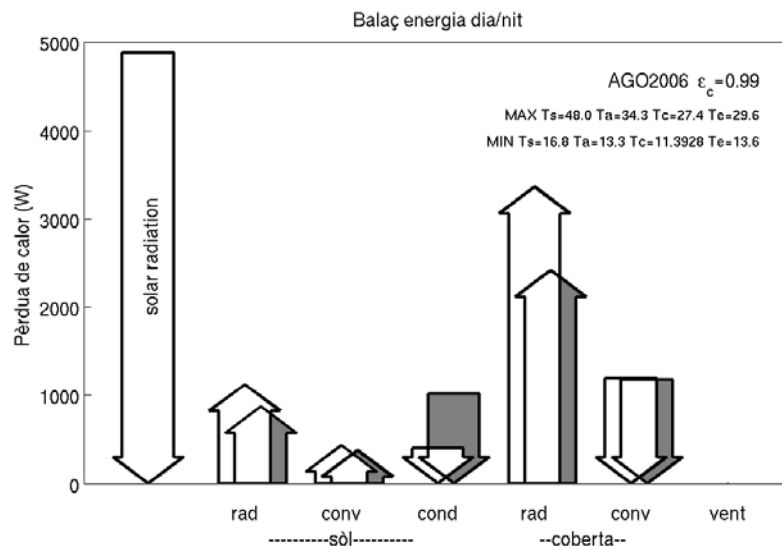
Si comparem les dues figures, trobem com a diferència acusada el desplaçament de les corbes cap a la dreta per al cas en que la emissivitat de coberta val 0,99, i per tant una temperatura a la superfície del sòl més elevada. Una possible hipòtesis per explicar això seria que en el cas en que l'Emissivitat pren el valor de 0,01 la radiació que prové del sòl no serà absorbida per la coberta, sinó que la traspasarà per anar a irradiar directament a l'atmosfera. La coberta doncs s'escalfarà menys, i tal com hem vist en els intercanvis coberta interior, aquest darrer es refredarà més. Com a conseqüència de tot això, el sòl perdrà el calor més ràpidament. Però com es pot veure a les taules següents, en el cas en que l'Emissivitat pren el valor de 0,01 la temperatura interior és més elevada que en el cas en que pren un valor de 0,99, la qual cosa indica que la coberta es refreda molt més en el cas en que l'Emissivitat de coberta val 0,99 que no pas quan val 0,01, i ho fa de tal manera que no dóna temps al sistema de termoregular la situació, segurament degut a la gran inèrcia tèrmica del sòl. Comparant les taules 29 i 30 es pot observar aquesta controvèrsia de com per al cas d'emissivitat 0,99 la temperatura del sòl és superior a la de 0,01, però en canvi, la temperatura interior serà menor.

6.1.6 Balanç global d'energia

Les figures que es mostren a continuació representen els guanys i les pèrdues energètiques de l'hivernacle per al cas en que l'Emissivitat de coberta val 0,01 o 0,99, tant pel dia com per la nit (fletxes ombrejades):



Gràfic 34 : Representació del balanç global d'energia per a una Emissivitat de 0,01; estiu del 2006.



Gràfic 35 : Representació del balanç global d'energia per a una Emissivitat de 0,99, estiu del 2006.

Aquestes dues figures mostren els fluxos d'energia entre els diferents components de l'hivernacle. En el cas del sòl veiem com en el cas en que l'Emissivitat de coberta val 0,01 són molt més importants les pèrdues per radiació tant pel dia com per la nit, mentre que en l'altre cas hi participa també la convecció. Pel que fa als guanys de calor del sòl per

conducció, aquestes seran més importants per la nit (degut a la davallada de la temperatura de la superfície del sòl).

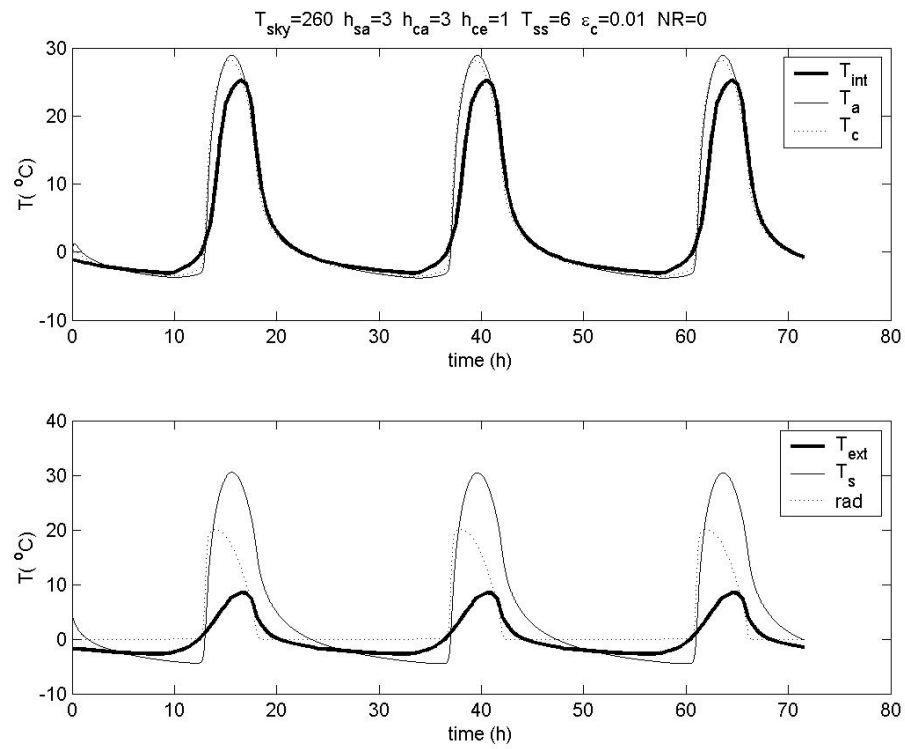
Respecte la coberta, es veuen dos fenòmens diferents: per una banda, quan l'Emissivitat val 0,01 les pèrdues per radiació són gairebé inexistents tant de dia com de nit, sent aquestes degudes per convecció i durant el dia. Per l'altra banda, en el cas d'emissivitat 0,99, en que la coberta es considera com un cos negre que absorbeix tota la radiació que emet el sòl per anar irradiant-la després cap a l'atmosfera, predomina clarament la radiació com a mecanisme de pèrdua d'energia (sobretot durant el dia). Encara i així, també s'observa en aquest cas una aportació de calor per part de l'atmosfera mitjançant convecció tant de dia com de nit.

A continuació s'aplicarà el model procedint de la mateixa manera, tot i fent servir però, els valors propis d'hivern per als paràmetres d'estudi:

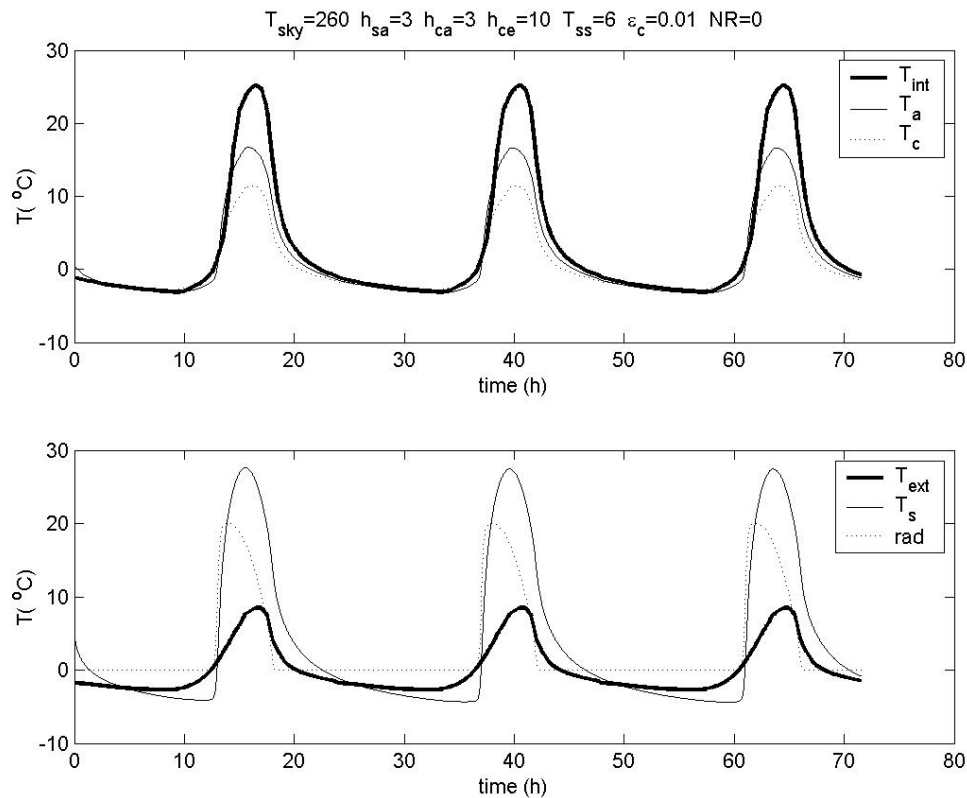
6.2 Hivern 2006

6.2.1 Coeficient de convecció coberta - aire exterior (h_{ce})

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció extern per a introduir al programa, des de 1 fins a 10 W/m^2K . El dia per al que s'ha fet servir el model presentava una temperatura exterior màxima de 8,5 °C i una temperatura exterior mínima de -2,7 °C. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 1 i 10 W/m^2K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:



Gràfic 36 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ca} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ce} = 1$, a l'hivern del 2006.

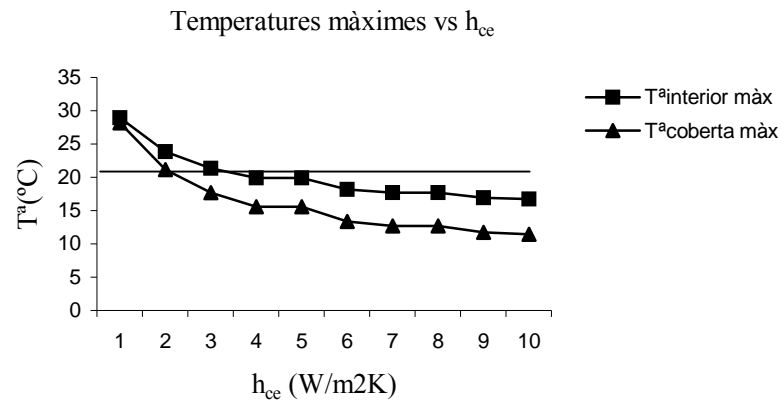


Gràfic 37 : cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per a h_{ca} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ce} = 10$, a l'hivern del 2006.

Pel que fa a les temperatures màximes, presenten el mateix comportament que en el cas d'estiu, tendint doncs cap a la disminució de la temperatura interna, a mesura que augmenta el valor del coeficient de convecció. A diferència que en el cas d'estiu, no s'arribarà a l'equilibri entre la temperatura de coberta i l'exterior al arribar a un cert valor d' h_{ce} , sinó que s'observa com la temperatura interior predita continua disminuint encara per sota de la empírica ($21,5^{\circ}\text{C}$), arribant el seu valor a estar molt per sota d'aquesta darrer. Les temperatures interiors predites pel model arribaran a ser força baixes, arribant fins i tot a ser inferiors a les exteriors. Encara i així, per tal de minimitzar aquests efectes, s'utilitzen valors més baixos de T_{sky} durant el dia.

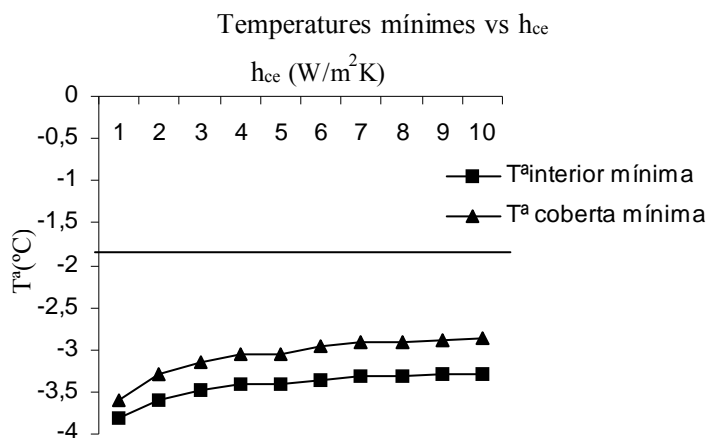
Al gràfic 38 es pot apreciar la gran diferència dels resultats entre un valor de 1 (gairebé no es considera convecció), on les temperatures de l'interior i de la coberta arriben a superar els 28°C i un altre de $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ amb el que les temperatures arriben a disminuir fins a uns 12°C (o 17°C per al cas de la coberta) mostrant una gran sensibilitat al canvi de

valor del coeficient i apropant-se més a les dades empíriques (la temperatura interior màxima empírica és d'uns 10 °C).



Gràfic 38: valors de la temperatura màxima interior i de la coberta donats pel model per a diferents h_{ce} , mantenint h_{ca} i h_{sa} els seus valors de referència, al desembre del 2006.

En el cas de les temperatures mínimes s'observen (gràfic 39), a diferència que en el cas d'estiu, uns lleugers augments de temperatura en la coberta i en l'interior, apropant-se a la temperatura mínima empírica (-1,8°C). Destaca també la lleugera variació de passar d'un coeficient d'1 W/m²K a un altre de 5 W/m²K. A partir d'aquest valor, la variació de temperatura s'estabilitzarà: durant la nit, quan el coeficient de convecció extern val 1, la T^a de la coberta serà menor que per a valors més alts i així progressivament, degut a que es produiran menys pèrdues per radiació. També s'observa com el flux de calor, a diferència de l'estiu, va de l'exterior de l'hivernacle cap a dins.



Gràfic 39: valors de la temperatura mínima interior i de la coberta donats pel model per a diferents h_{ce} , mantenint h_{ca} i h_{sa} , els seus valors de referència, a l'hivern del 2006.

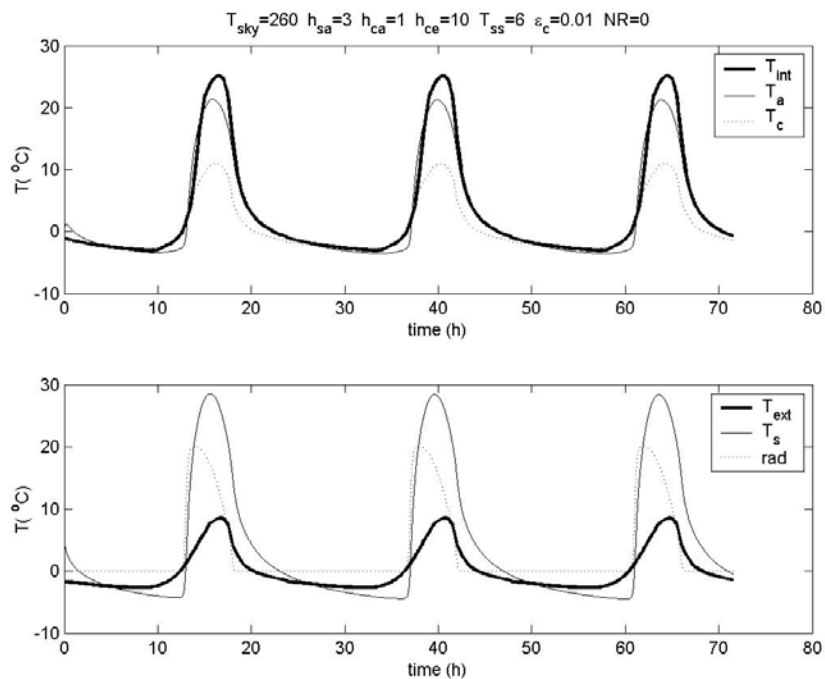
Els fets observats en els gràfics anteriors, venen corroborats pels valors numèrics de la següent taula:

h_{ce} (W/m ² K)	$T_{ª}^{int\ màx}$ (°C)	$T_{ª}^{coberta\ màx}$ (°C)	$T_{ª}^{int\ mín}$ (°C)	$T_{ª}^{coberta\ mín}$ (°C)
1	28,95	28,22	-3,80	-3,60
2	23,84	21,14	-3,59	-3,30
3	21,33	17,66	-3,49	-3,15
4	19,86	15,62	-3,41	-3,06
5	19,86	15,62	-3,42	-3,06
6	18,19	13,34	-3,35	-2,96
7	17,66	12,65	-3,32	-2,92
8	17,66	12,65	-3,32	-2,92
9	16,95	11,73	-3,29	-2,88
10	16,70	11,40	-3,28	-2,86

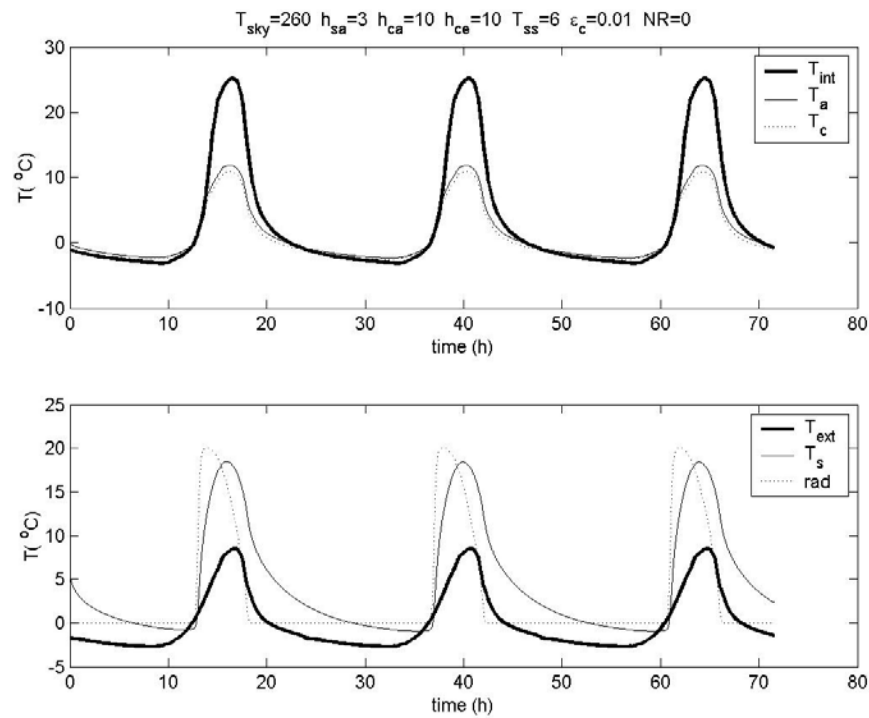
Taula 29: Resultats del model segons diferents valors de h_{ce}

6.2.2 Coeficient de convecció coberta - aire interior (h_{ca}) :

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció intern per a introduir al programa, des de 1 fins a 10 (W/m^2K). A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 1 i 10 W/m^2K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:



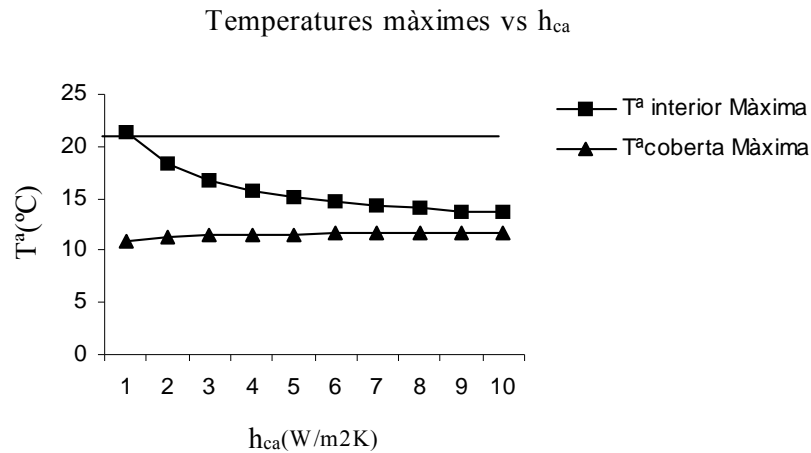
Gràfic 40 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients h_{ce} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ca} = 1$, a l'hivern del 2006.



Gràfic 41 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients h_{ce} i h_{sa} , i amb valor de $h_{ca} = 10$, a l'hivern del 2006.

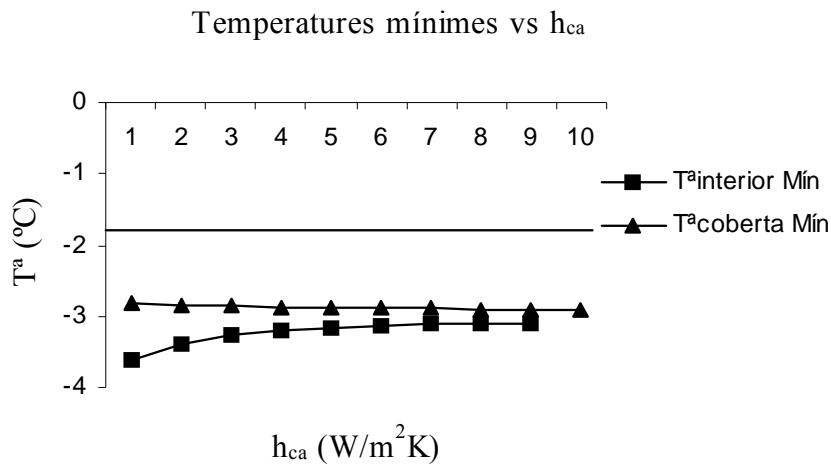
Els gràfics senyalen cap a una disminució de la temperatura interior a mesura que augmentem el valor del coeficient h_{ca} , allunyant-se així dels valors empírics.

A continuació es mostraran els gràfics que mostren la tendència de la evolució de les temperatures:



Gràfic 42: valors de la temperatura màxima interior i de la coberta donats pel model per a diferents h_{ca} mantenint h_{ce} i h_{sa} , els seus valors de referència , a l'hivern del 2006.

Com en el cas d'estiu, durant el dia, a mesura que augmenta el coeficient de convecció disminueix la temperatura interior màxima. La temperatura de l'interior tendeix a disminuir ja que durant el dia la coberta es va refredant degut a l'intercanvi de calor amb l'exterior i per tant aquesta no transmetrà calor cap a l'interior. En aquest cas però, la temperatura de coberta no disminueix sinó que arriba a experimentar un augment de fins 0,7-0,8 °C. Això indica un flux convectiu durant el dia, tal i que l'aire de l'interior, que es va escalfant durant el dia degut a la radiació transmesa directa o indirectament escalfa la coberta, tot i refredant-se, augmentant la seva densitat per a descendir i tornar a escalfar-se i així successivament.



Gràfic 43: valors de la temperatura mínima interior i de la coberta donats pel model per a diferents h_{ca} mantenint h_{ce} i h_{sa} , els seus valors de referència , a l'hivern del 2006.

Durant la nit (gràfic 43) , la T^a de coberta es refreda inapreciablement (algunes centèsimes de grau) degut a que la temperatura de coberta i l'exterior (-2,7°C) són pràcticament iguals. Al augmentar el coeficient de convecció intern, augmenta però la T^a de l'interior, segurament a que aquest s'escalfa per la pròpia coberta, ja que la T^a de l'interior predita és menor que la de la coberta i l'exterior.

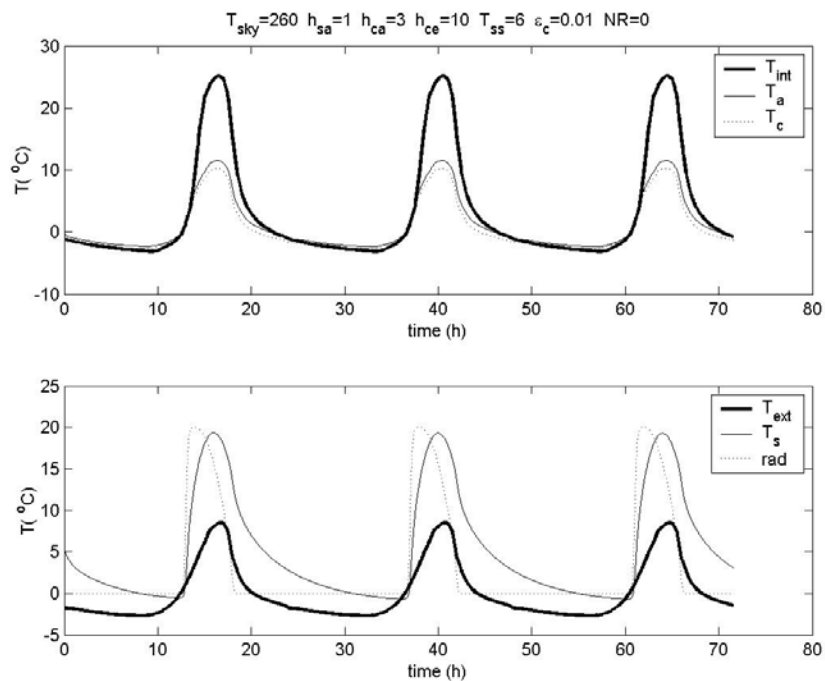
Els fets observats en els gràfics anteriors, ve corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

h_{ca} (W/m ² K)	$T^a_{int} \text{ màx(°C)}$	$T^a_{coberta} \text{ màx(°C)}$	$T^a_{int} \text{ mín(°C)}$	$T^a_{coberta} \text{ mín(°C)}$
1	21,37	10,93	-3,62	-2,82
2	18,26	11,25	-3,40	-2,85
3	16,7	11,4	-3,28	-2,86
4	15,74	11,51	-3,21	-2,87
5	15,10	11,57	-3,16	-2,88
6	14,63	11,62	-3,12	-2,88
7	14,29	11,65	-3,10	-2,89
8	14,02	11,68	-3,10	-2,90
9	13,81	11,70	-3,10	-2,90
10	13,64	11,72	-3,05	-2,90

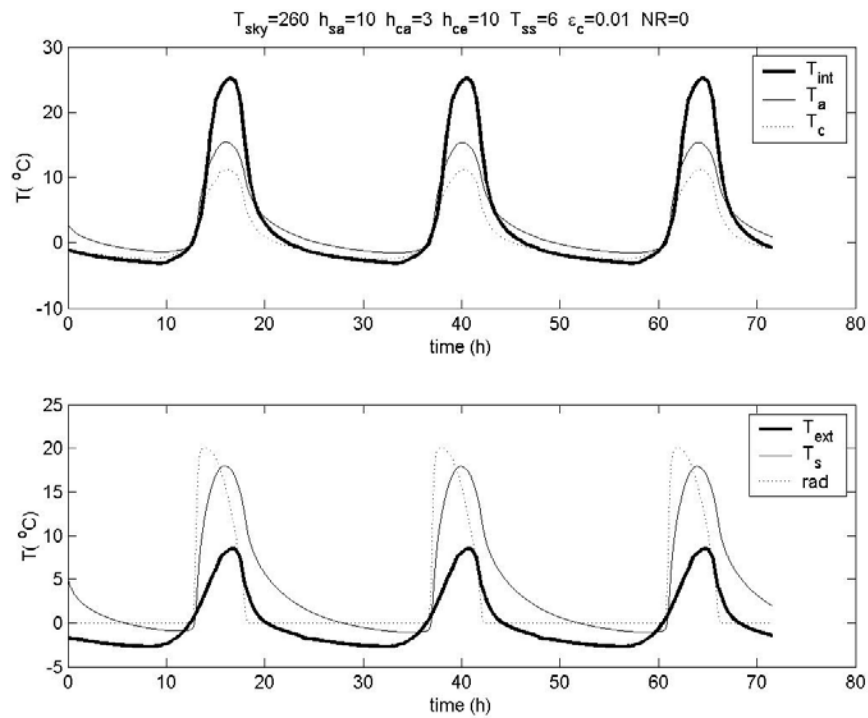
Taula 30: Resultats del model segons diferents valors de h_{ca}

6.2.3 Coeficient de convecció sòl-aire interior (h_{sa})

S'han agafat com a valors de coeficient de convecció extern per a introduir al programa des de 1 fins a 10 (W/m^2K). A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 1 i 10 W/m^2K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:

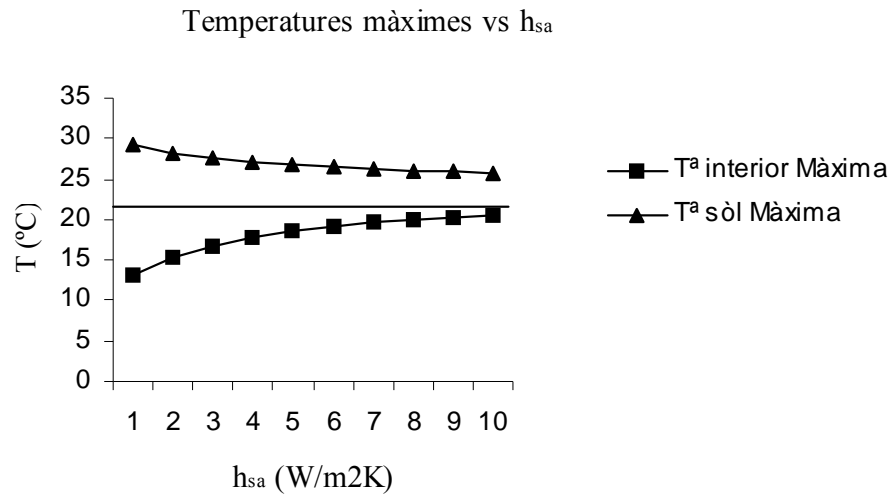


Gràfic 44 :Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per a h_{ce} i h_{ca} , i amb valor de $h_{sa} = 1$, a l'hivern del 2006.



Gràfic 45 :Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per a h_{ce} i h_{ca} , i amb valor de $h_{sa} = 10$, a l'hivern del 2006.

En aquest cas, quant més gran és el valor que pren el coeficient de convecció, més s'aproxima el valor de les temperatures predites a les empíriques. Aquest fet explica el fenomen de transferència de calor del sol cap a l'aire de l'interior, fent que quant major sigui el coeficient de convecció, més s'escalfi l'interior. Aquest fet s'observa clarament al veure gràficament les tendències de les temperatures màximes:

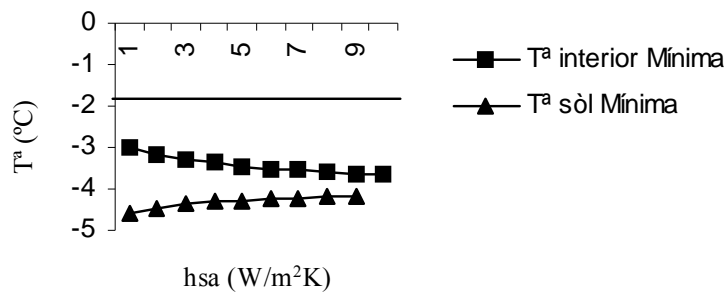


Gràfic 46 : valors de la temperatura màxima interior i del sòl donats pel model per a diferents $h_{sòl}$, mantenint h_{ca} i h_{ce} , els seus valors de referència, a l'hivern del 2006.

En aquest cas però, i a diferència del cas d'estiu, la T^a del sòl disminueix significativament a mesura que augmenta el valor del coeficient de convecció entre el sòl i l'interior, degut segurament a que en ésser la conductivitat tèrmica tant baixa, el calor s'estanca més cap a capes més superficials, afavorint així una transferència de calor més ràpida cap a l'aire de l'interior.

En el cas de les temperatures mínimes, la tendència és la contrària:

Temperatures mínimes vs h_{sa}



Gràfic 47 : valors de la temperatura mínima interior i del sòl donats pel model per a diferents valors d' h_{sa} , mantenint h_{ca} i h_{ce} , els seus valors de referència, a l'hivern del 2006.

S'observa una tendència descendent en el cas de les temperatures internes, mentre que el sòl presenta un lleuger augment en la seva temperatura, lo que mostra un flux d'energia de l'interior cap el sòl. Això succeeix perquè l'interior de l'hivernacle està més calent que el sòl, degut al baix valor de conductivitat tèrmica, limitant així encara més el seu efecte esmorteïdor de cara a la nit.

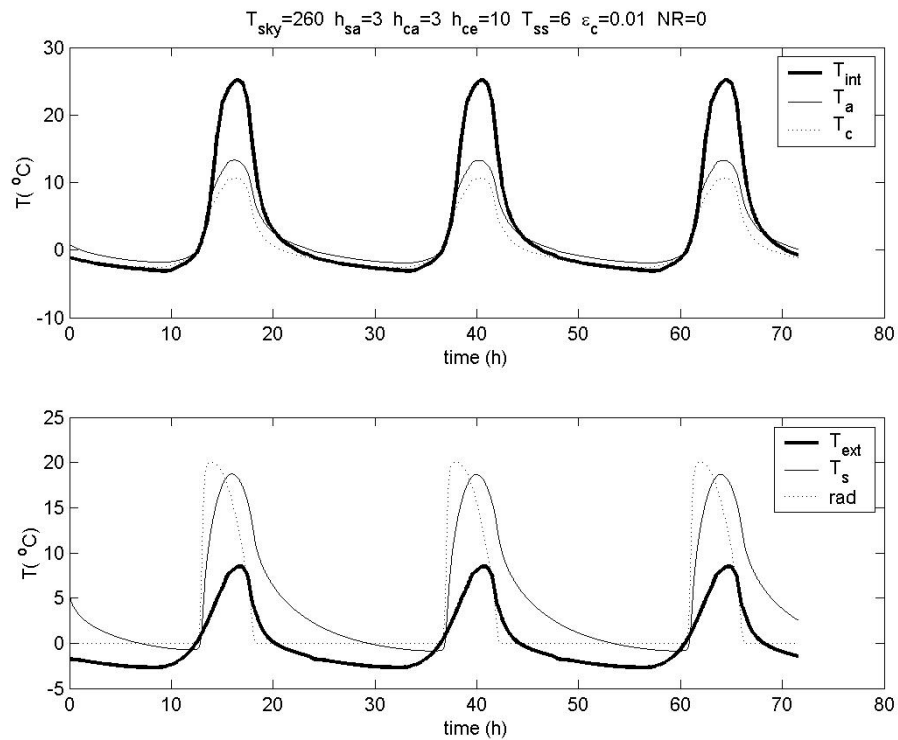
Els fets observats en els gràfics anteriors, vé corroborat pels valors numèrics de la següent taula:

h_{sa} (W/m ² K)	T ^a int màx (°C)	T ^a Sòl màx(°C)	T ^a int mín (°C)	Sòl mín (°C)
1	13,18	29,26	-2,98	-4,59
2	15,26	28,28	-3,15	-4,45
3	16,70	27,6	-3,28	-4,36
4	17,72	27,11	-3,38	-4,31
5	18,51	26,74	-3,45	-4,27
6	19,11	26,45	-3,50	-4,24
7	19,60	26,21	-3,55	-4,22
8	20,00	26,02	-3,60	-4,20
9	20,33	25,86	-3,63	-4,19
10	20,62	25,72	-3,66	-4,17

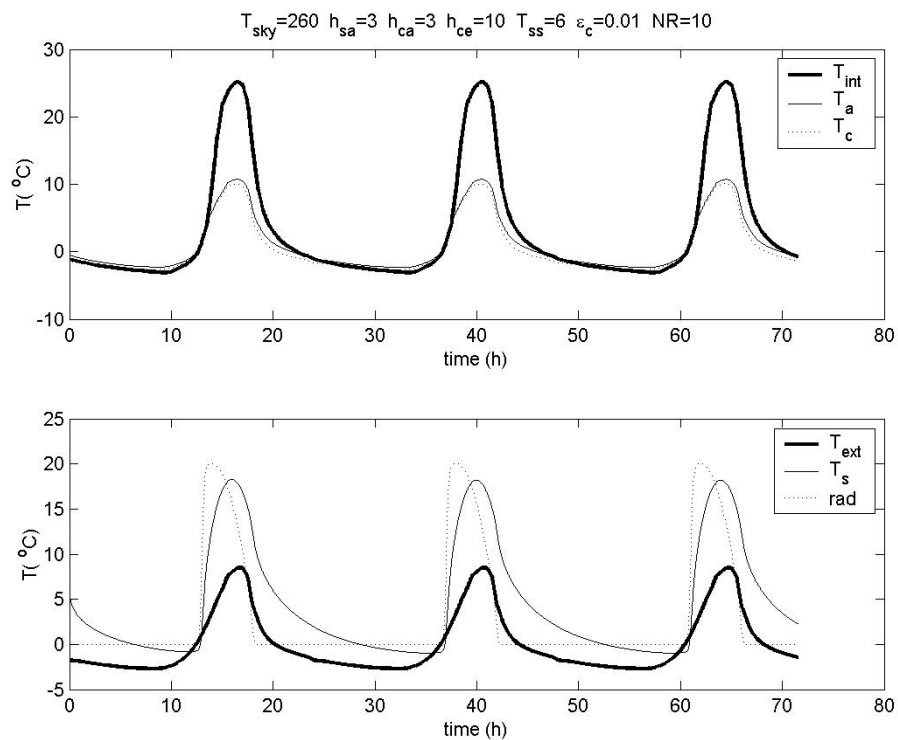
Taula 31: Resultats del model segons diferents valors de h_{sa}

6.2.4 Número de renovacions per hora

En aquest cas, els valors a introduir t aniran des de 0 fins al 10 W/m²K. A continuació es mostren els gràfics que representen les temperatures externes i internes de manera empírica, així com també el valor de la radiació i les temperatures del sòl, internes i de la coberta de l'hivernacle predites pel model per als valors de 0 i 10 W/m²K per tal d'observar diferències qualitatives, pel que fa a la relació entre temperatures interiors empíriques i predites:

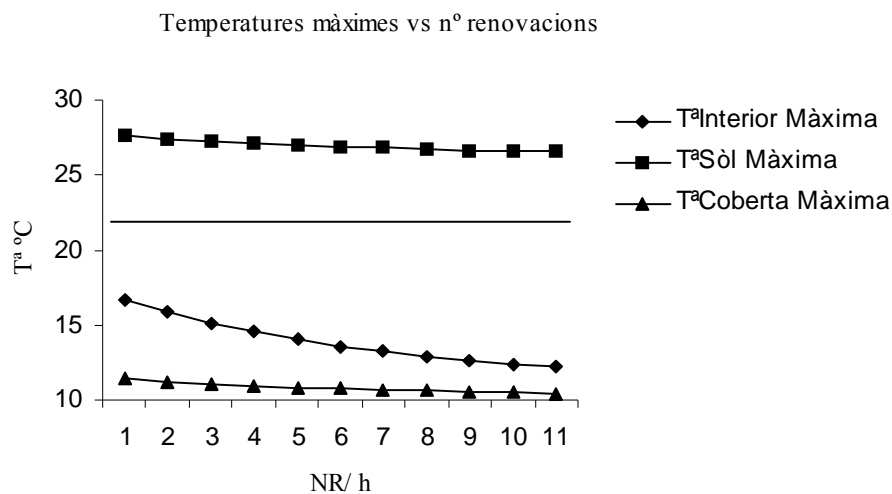


Gràfic 48 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, desenvolupat pel model amb valors de referència per als coeficients de convecció, i un $NR = 0$, a l'hivern del 2006.



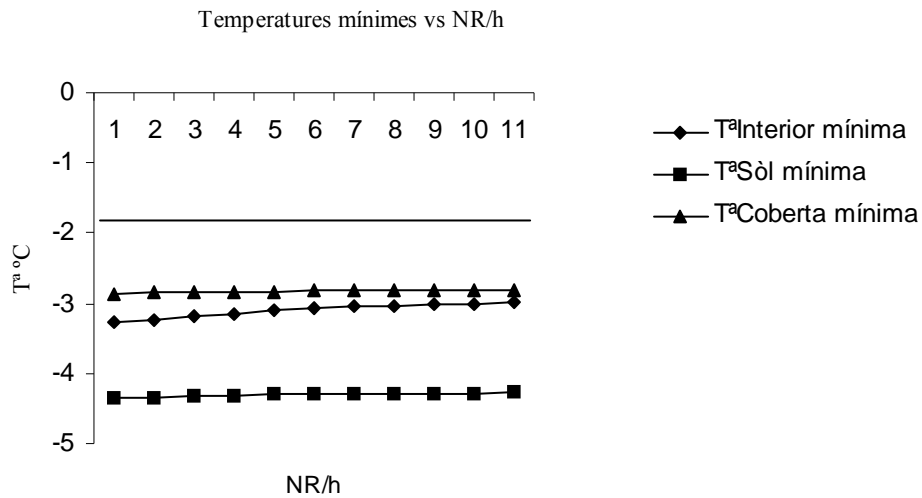
Gràfic 49 : Resultats del model per a un cicle de temperatures de tres dies, amb valors de referència per als coeficients de convecció, i un $NR = 10$, a l'hivern del 2006.

Pot observar-se les temperatures interiors predites disminueixen en augmentar el número de renovacions per hora, allunyant-se així a les dades empíriques, encara que molt lleugerament. Aquest fet pot observar-se en la representació de les tendències de les temperatures màximes:



Gràfic 50 : valors de la temperatura màxima interior, del sòl i de la coberta donats pel model per a diferent nombre de renovacions, per als valors de referència dels diferents coeficients de convecció a l'hivern del 2006.

Com en el cas anterior, la variació en les temperatures mínimes del sòl, coberta i l'interior en augmentar el número de renovacions per hora és molt petita (gràfic 52). Encara i així, la tendència és contrària al cas anterior, tendint així a augmentar les temperatures en augmentar el número de renovacions, degut a que la temperatura de l'exterior és superior a la de l'interior predita pel model.



Gràfic 51 : valors de la temperatura mínima interior, del sòl i de la coberta donats pel model per a diferent nombre de renovacions, per als valors de referència dels diferents coeficients de convecció a l'hivern del 2006.

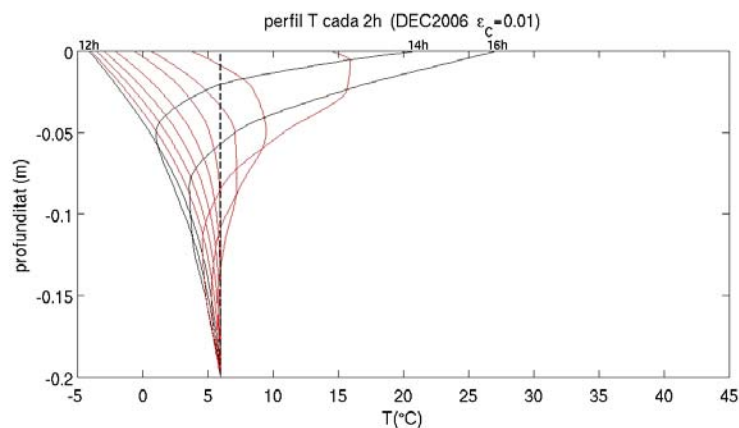
Els fets presentats es corroboren numèricament a la següent taula:

NR	Tªint màx (°C)	Tª Sòl màx (°C)	Tª cob màx (°C)	Tªint mín (°C)	Sòl mín (°C)	Tª Cob mín (°C)
0	16,70	27,60	11,40	-3,28	-4,36	-2,86
1	15,82	27,41	11,21	-3,23	-4,35	-2,85
2	15,11	27,24	11,07	-3,18	-4,33	-2,84
3	14,52	27,11	10,95	-3,14	-4,32	-2,83
4	14,02	26,99	10,84	-3,10	-4,30	-2,83
5	13,59	26,89	10,75	-3,08	-4,30	-2,82
6	13,22	26,80	10,67	-3,05	-4,30	-2,82
7	12,91	26,73	10,59	-3,03	-4,29	-2,81
8	12,62	26,66	10,56	-3,01	-4,28	-2,80
9	12,38	26,60	10,49	-3,00	-4,28	-2,80
10	12,16	26,54	10,45	-2,98	-4,27	-2,80

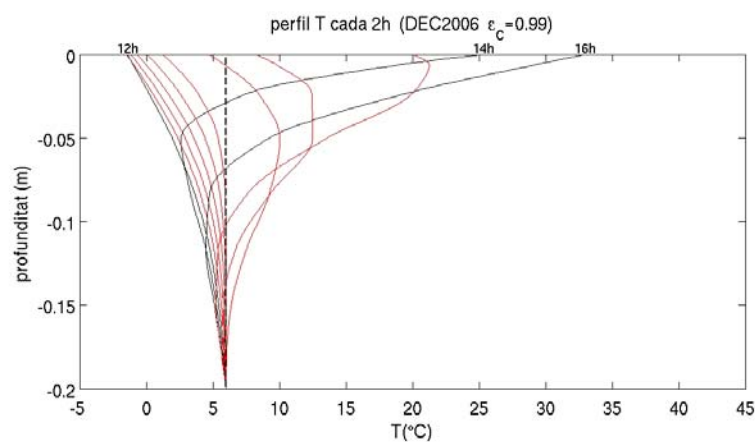
Taula 32: Resultats del model segons diferents valors de n° renovacions

6.2.5 Perfil de temperatures del subsòl

A continuació es presenten dues figures en les que es representen els perfils de la temperatura del subsòl a través d'una profunditat de 20cm en períodes de dues hores, per a dos casos diferent, cas en que l'Emissivitat de coberta pren el valor de 0,01 i per al que pren un valor de 0,99:



Gràfic 52 : Perfil de temperatures del subsòl a diferents profunditats , per a una Emissivitat de 0,01, a l'hivern del 2006.

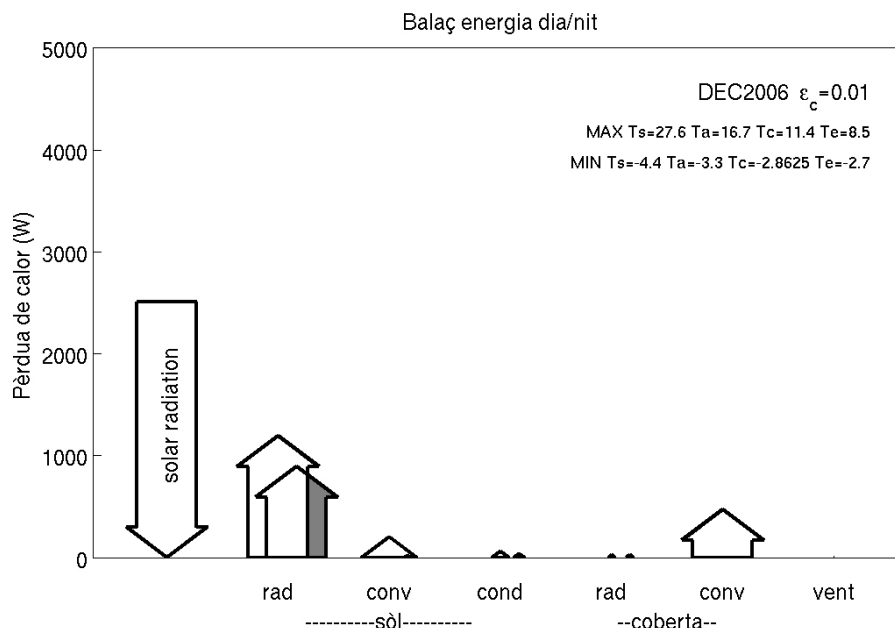


Gràfic 53 : Perfil de temperatures del subsòl a diferents profunditats , per a una Emissivitat de 0,99 , a l'hivern del 2006.

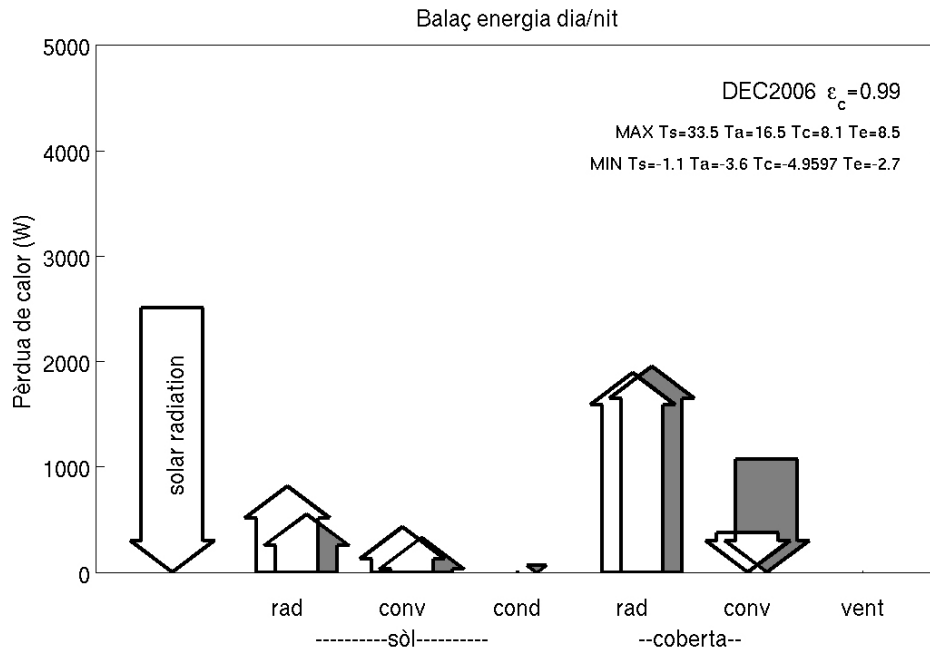
En aquest cas, com succeïa a L'estiu, les diferències entre els dos valors d'emissivitat de coberta radiquen en el desplaçament de les corbes cap a la dreta, en el cas en que l'emissivitat sigui de 0,99, mostrant així temperatures més elevades. Pel que fa a les diferències respecte les figures d'estiu destaquen les formes de les corbes, amb una forma de ganxo més pronunciada com a representació del retard en el refredament del subsòl. El motiu pel que aquest retard és més pronunciat durant al mes d'hivern que no pas al d'estiu és la baixa conductivitat tèrmica (0,2) que hem escollit com a valor de referència. Aquesta és la responsable doncs de que durant el dia costi més de que el calor es dissipï cap a horitzons més profunds, fet observable en les corbes relatives a les 14:00 i 16:00h on a partir dels 0,05 i 0,1 m les temperatures cauen gairebé en picat. De la mateixa manera, a partir de les 20:00h s'observen retards més acusats en el refredament de capes per sota de la superfície del sòl, deguts també a la menor conductivitat tèrmica.

6.2.6 Balanç global d'energia

Les figures que es mostren a continuació representen els guanys i les pèrdues energètiques de l'hivernacle per al cas en que l'Emissivitat de coberta val 0,01 o 0,99, tant pel dia com per la nit:



Gràfic 54 : representació del balanç global d'energia per a una Emissivitat de 0,01, a l'hivern del 2006.



Gràfic 55 : representació del balanç global d'energia per a una Emissivitat de 0,99 , a l'hivern del 2006.

Pel que fa al balanç del sòl, en el cas de l'hivern ens trobem amb que tant les pèrdues com els guanys d'energia per conducció són gairebé insignificants per als dos casos i tant de dia com de nit., degut sobretot al baix valor del coeficient de conducció que produeix més estanquitat. Les pèrdues per radiació són una mica més elevades en el cas en que l'emissivitat de coberta val 0,01 que no pas quan val 0,99 i sempre més elevades també durant el dia que no pas durant la nit, comportament que coincideix amb la situació d'estiu.

En el cas de la coberta, quan l'emissivitat val 0,01 tornem a veure com es produeixen pèrdues de calor durant el dia mitjançant la convecció, mentre que quan l'emissivitat augmenta fins a 0,99 es produeixen grans pèrdues a través de la coberta per radiació (més durant el dia que no pas durant la nit) i certs guanys per convecció, sent aquests més elevats per la nit que no pas durant el dia. Aquests fets també coincidiran amb els del cas d'estiu, juntament amb el fet que amb una emissivitat de 0,99 la temperatura del sòl és molt més elevada, al contrari que la de l'interior (gràfics 55 i 56), encara que aquesta



disminueix en menor grau, en proporció a l'estiu (de 16,7°C a 16,5°C), també perquè les pèrdues de calor de la coberta per radiació són força menors.

6.3 Taula Resum dels coeficients de convecció

A continuació es mostra una taula amb l'efecte que provoca un augment en el valor dels diferents coeficients de convecció, així com el del número de renovacions/hora, sobre els diferents components de l'hivernacle tan de dia com de nit, i tant a l'agost com a l'hivern. Com a criteri global, es considera que l'augment del coeficient de convecció produeix algun efecte sobre una determinada temperatura, quan aquesta varia com a mínim uns 0,5°C:

Paràmetre	Horari	Temperatura	Efecte a l'Estiu	Efecte a l'Hivern
Coef he	Dia	T ^a Coberta T ^a Interior	DISMINUEIX DISMINUEIX	DISMINUEIX DISMINUEIX
	Nit	T ^a Coberta T ^a Interior	DISMINUEIX DISMINUEIX	AUGMENTA AUGMENTA
Coef hca	Dia	T ^a Coberta T ^a Interior	AUGMENTA DISMINUEIX	AUGMENTA DISMINUEIX
	Nit	T ^a Coberta T ^a Interior	ESTABLE DISMINUEIX	ESTABLE AUGMENTA
Coef hs	Dia	T ^a Sòl T ^a Interior	ESTABLE AUGMENTA	ESTABLE AUGMENTA
	Nit	T ^a Sòl T ^a Interior	AUGMENTA AUGMENTA	AUGMENTA DISMINUEIX
NºRenov	Dia	T ^a Coberta T ^a Interior T ^a Sòl	ESTABLE DISMINUEIX DISMINUEIX	ESTABLE DISMINUEIX DISMINUEIX
	Nit	T ^a Coberta T ^a Interior T ^a Sòl	ESTABLE ESTABLE ESTABLE	ESTABLE ESTABLE ESTABLE

Taula 33: Efectes dels coeficients de convecció sobre les temperatures de coberta, interior i del sòl .

7 CONCLUSIONS GENERALS

Com s'ha vist anteriorment, en la primera part del treball s'ha estudiat el comportament tèrmic de l'hivernacle sota tres condicions diferents, per a veure si aquest podia arribar a ser autosuficient per a desenvolupar un cultiu a petita escala. Com a resultat s'ha vist que l'hivernacle requereix millores tècniques per tal d'aconseguir temperatures més elevades a la nit (Cal recordar que el cas per al dia d'agost estudiat empíricament és atípic i presenta unes temperatures més baixes de lo habitual) , tant a l'estiu com a l'hivern, i que per al cas de l'hivern també cal algun sistema que eviti les baixes temperatures durant el dia. L'addició d'una bassa amb aigua a l'estiu permet suavitzar la caiguda de temperatures a la nit, com s'ha pogut comprovar per a l'agost del 2007. Malgrat això, cal remarcar que aquesta prova no té validesa científica, ja que l'estudi hauria d'haver-se efectuat en paral·lel, i no en dos Estius diferents.

Altres millores que es podrien aplicar per combatre les baixes temperatures i optimitzar l'estalvi energètic podrien ser l'augment de l'estanquitat per tal d'evitar fuites i infiltracions a l'hivernacle, augmentar la superfície ocupada per aigua (piles de bidons o bosses de plàstic), col·locar un plàstic com a pantalla o utilitzar una coberta de doble capa per tal d'augmentar l'opacitat a l'infraroig d'ona llarga. També seria adient aïllar la superfície interior Nord amb un material aïllant reflexiu alhora.

Respecte el segon objectiu, s'han estudiat un a un diferents paràmetres amb l'ajut del model per tal de veure com afectaven en el comportament de l'hivernacle, tot i podent extraure algunes conclusions:

- De manera general, el model aconsegueix reproduir fidelment la realitat, mostrant un comportament de l'hivernacle a l'estiu i a l'hivern força similar, excepte per alguns casos de nit a l'hivern, on els fluxos de calor són de sentit contrari que a l'estiu.
- Respecte els resultats del model segon sels valors de h_{ce} , la coberta i l'interior de l'hivernacle presenten una gran sensibilitat a les variacions d'aquest coeficient de dia, en el sentit que aquestes disminueixen en augmentar h_{ce} . De nit les variacions seran menors degut a que el mecanisme d'intercanvi energètic predominant és la radiació. A

més, en el cas d'estiu les temperatures de l'interior i la coberta tendiran a disminuir fins estabilitzar-se a mesura que augmenta h_{ce} , mentre que a l'hivern tendiran a augmentar.

- Pel que fa als resultats del model segons els valors de h_{ca} que hem introduït s'observa el mateix comportament durant el dia tant a l'estiu com a l'hivern, en el sentit que la temperatura de la coberta tendeix a augmentar i la de l'interior a disminuir a mesura que augmenta el valor de h_{ca} . Durant la nit, les temperatures de l'interior tendeixen a disminuir en el cas d'estiu i a augmentar en el cas d'hivern, mentre que la temperatura de coberta arriba pràcticament a estabilitzar-se per al cas d'estiu, i en el cas d'hivern ho fa amb un valor aproximat de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Respecte el coeficient h_{sa} s'ha vist com per al cas d'estiu, al augmentar el seu valor, les temperatures interiors augmenten tant de dia com de nit gràcies a la calor aportada pel sol, mentre que la temperatura d'aquest es manté pràcticament estable, com a conseqüència de la seva elevada inèrcia tèrmica. Per altra banda, a l'hivern la temperatura del sol variarà considerablement disminuint durant el dia i augmentant durant la nit, degut al baix valor de conductivitat tèrmica introduït al model. Aquest darrer fet afectarà també al sol la seva propietat d'esmoreïdor de temperatures.
- El número de renovacions farà disminuir la temperatura interior durant el dia tant a l'estiu com a l'hivern, mentre que aquest efecte disminuirà a la nit per al cas d'estiu, i en el cas d'hivern succeirà lo contrari, i la temperatura interior tendirà a augmentar, com a conseqüència de que les temperatures externes a arriben a ser superiors a les de l'interior.
- L'emissivitat de la coberta és un paràmetre clau a l'hora d'estimar les pèrdues de l'hivernacle: una emissivitat de 0,99 representarà una temperatura de sol més elevada, així com una interior més baixa. Destacar, a més, que una emissivitat elevada implica pèrdues energètiques de la coberta mitjançant el fenomen de radiació, en front del de convecció.



Malgrat tot, es podrien també introduir alguns canvis en el model per tal d'intentar millorar-lo: es podria introduir un valor de $T^{\text{a}}_{\text{sky}}$ variable (més elevat durant el dia i més baix durant la nit), fer variable també el valor dels coeficients de convecció, contemplar la sortida gradual del sol o fins i tot tractar de construir un model més complert, tot i tenint en compte també els fenòmens d'evaporació i condensació, o l'existència de vegetació.



ANNEX 1 : ARXIU “ HIV “ DEL MODEL

```
function dx=hiv(t,x,ft,f,parametres) %entrar Te des de fora
f2=interp1(ft,f,t); %interpolat f al temps t
eval(parametres);
a=2/d_s;
[D1Z,z]=cheb(N); % N+1 x N+1
D2Z=D1Z*D1Z;

% EQUACIONS
E_a=1/(rho_a*Cp_a*V);
E_c=1/(rho_c*C_c*A_c*d_c);
dx=zeros(13,1);

% TEMPS
dx(1)=1; % [s] temps
f1=sol2(lat,data,x(1)-DT*3600,hs,hp); % RADIACIO SOLAR

J1=(sb*(x(2)+273)^4+(R1/R12)*sb*(x(12)+273)^4+(R1/R13)*sb*Tsky^4)...
/(1+(R1/R13)+(R1/R12));

% CALOR ABSORBIT PEL SOL [W/m2]
q=(1-Psi)*I*A_s*tau*alpha_s*f1-hsa*A_s*(x(2)-x(11))+(J1-sb*(x(2)+273)^4)/R_s;
q=q/A_s;

% MATRIUS DERIVACIO
DZ=D2Z(2:N,2:N)-(1/D1Z(1,1))*D2Z(2:N,1)*D1Z(1,2:N);
DZC=D2Z(2:N,N+1)*Tss...
-(D1Z(1,N+1)/D1Z(1,1))*D2Z(2:N,1)*Tss+(1/D1Z(1,1))*D2Z(2:N,1)*(q/k_s)*(1/a);

% TEMPERATURA INTERIOR SOL (MAX 10)
```




```
% N+1 punts de colocacio -> N-1 equacions
for n=3:N+1
dx(n)=kappa_s*(a^2)*(DZ(n-2,:)*x(3:N+1)+DZC(n-2));
end;

% TEMPERATURA AIRE
dx(11)=-E_a*hca*A_c*(x(11)-x(12))...
+E_a*hsa*A_s*(x(2)-x(11))...
-NR/3600*(x(11)-f2); % ventilaci'o cp aire

% TEMPERATURA COBERTA
dx(12)=E_c*I*A_s*alpha_c*f1...
-E_c*hce*A_c*(x(12)-f2)...
+E_c*hca*A_c*(x(11)-x(12))...
+E_c*(sb*Tsky^4-sb*(x(12)+273)^4)/R_ce...
-E_c*(sb*(x(12)+273)^4-J1)/R_sc;

% TEMPERATURA SUPERFICIE SOL
T0=(1/D1Z(1,1))*(q/k_s)*(1/a)-(D1Z(1,N+1)/D1Z(1,1))*Tss-
(1/D1Z(1,1))*D1Z(1,2:N)*x(3:N+1);
dx(2)=x(2)-T0;
```



ANNEX 2: ARXIU “HIV RUN “ DEL MODEL

```
function hivrun(varargin);  
if (nargin == 0)  
    disp('hivrun NOM figx');  
    disp('NOM_param.m: parametres');  
    disp('NOM_temp.dat: temperatures externes');  
    disp('figx: fitxer de dibuix');  
    return;  
end  
if (nargin == 2)  
    grafic=varargin{2};  
else  
    grafic='figt';  
end  
nom=varargin{1};  
parametres=strcat(varargin{1},'_param');  
fentrada=strcat(varargin{1},'_temp.dat');  
fsortida=strcat(varargin{1},'_result.dat');  
fsortida2=strcat(varargin{1},'_fluxos.dat');  
fsortida3=strcat(varargin{1},'_sumary.dat');  
eval(parametres);  
fin=load(fentrada);          % fitxer de temperatures en un dia  
  
% A PARTIR DAQUI NO MODIFICAR  
  
f=repmat(fin(:,1),rep,1);  
s=size(f,1);  
ft=0:1:s-1;  
ft=ft*1800;  
tf=(s-1)*1800;
```



```
M=[eye(13)];
M(2,2)=0;
options = odeset('Mass',M,'MassSingular','yes');
ci=zeros(1,13);
ci(1)=1;
ci(2:11)=[Tss Tss Tss Tss Tss Tss Tss Tss Tss 0];
ci(12)=0;
ci(13)=0;

[t,x]=ode15s(@hiv,0:dt:tf,ci,options,ft,f,parametres);
th=t/3600;
Te=interp1(ft,f,t);
rad=sol2(lat,data,x(:,1)-DT*3600,hs,hp);

Tsmx=max(x(:,2));
Tamax=max(x(:,11));
Tcmx=max(x(:,12));
Temax=max(Te);

disp(strcat('e=',num2str(epsilon_c)));
disp(strcat('MAX',' Ts=',num2str(Tsmx),' Ta=',num2str(Tamax),...
' Tc=',num2str(Tcmx),' Te=',num2str(Temax)))
n=size(t,1);
Tsmn=min(x(1000:n,2));
Tamin=min(x(1000:n,11));
Tcmn=min(x(1000:n,12));
Temn=min(Te);

disp(strcat('MIN',' Ts=',num2str(Tsmn),' Ta=',num2str(Tamin),...
' Tc=',num2str(Tcmn),' Te=',num2str(Temn)))

% VARIABLES AUXILIARS
```



```
J1=(sb*(x(:,2)+273).^4+(R1/R12)*sb*(x(:,12)+273).^4+(R1/R13)*sb*Tsky^4)...  
/(1+(R1/R13)+(R1/R12));  
f1=sol2(lat,data,x(:,1)-DT*3600,hs,hp);  
  
% FLUXOS DE CALOR  
[D1Z,z]=cheb(N); % N+1 x N+1  
a=2/d_s;  
  
% SOL  
qs1=(1-Psi)*I*A_s*tau*alpha_s*f1;  
qs2=k_s*A_s*(a)*(D1Z(N,1:N)*transpose(x(:,2:N+1))+D1Z(N,N+1)*Tss); %signe?  
qs2=transpose(qs2);  
qs3=-hsa*A_s*(x(:,2)-x(:,11));  
qs4=(J1-sb*(x(:,2)+273).^4)/R_s;  
  
% AIRE  
qa1=-hca*A_c*(x(:,11)-x(:,12));  
qa2=hsa*A_s*(x(:,2)-x(:,11));  
qa3=-Cp_a*rho_a*V*NR/3600*(x(:,11)-Te);  
  
% COBERTA  
qc1=I*A_s*alpha_c*f1;  
qc2=-hce*A_c*(x(:,12)-Te);  
qc3=hca*A_c*(x(:,11)-x(:,12));  
qc4=(sb*Tsky^4-sb*(x(:,12)+273).^4)/R_ce;  
qc5=-(sb*(x(:,12)+273).^4-J1)/R_sc;  
  
% MITJANES  
  
qs1m=(sum(qs1(n-T/dt:n))-(qs1(n-T/dt)+qs1(n))/2)/(T/dt);  
qs2m=(sum(qs2(n-T/dt:n))-(qs2(n-T/dt)+qs2(n))/2)/(T/dt);  
qs3m=(sum(qs3(n-T/dt:n))-(qs3(n-T/dt)+qs3(n))/2)/(T/dt);  
qs4m=(sum(qs4(n-T/dt:n))-(qs4(n-T/dt)+qs4(n))/2)/(T/dt);
```



$$Q_s = q_{s1m} + q_{s2m} + q_{s3m} + q_{s4m};$$

$$q_{a1m} = (\text{sum}(q_{a1}(n-T/dt:n)) - (q_{a1}(n-T/dt) + q_{a1}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{a2m} = (\text{sum}(q_{a2}(n-T/dt:n)) - (q_{a2}(n-T/dt) + q_{a2}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{a3m} = (\text{sum}(q_{a3}(n-T/dt:n)) - (q_{a3}(n-T/dt) + q_{a3}(n))/2) / (T/dt);$$

$$Q_a = q_{a1m} + q_{a2m} + q_{a3m};$$

$$q_{c1m} = (\text{sum}(q_{c1}(n-T/dt:n)) - (q_{c1}(n-T/dt) + q_{c1}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{c2m} = (\text{sum}(q_{c2}(n-T/dt:n)) - (q_{c2}(n-T/dt) + q_{c2}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{c3m} = (\text{sum}(q_{c3}(n-T/dt:n)) - (q_{c3}(n-T/dt) + q_{c3}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{c4m} = (\text{sum}(q_{c4}(n-T/dt:n)) - (q_{c4}(n-T/dt) + q_{c4}(n))/2) / (T/dt);$$

$$q_{c5m} = (\text{sum}(q_{c5}(n-T/dt:n)) - (q_{c5}(n-T/dt) + q_{c5}(n))/2) / (T/dt);$$

$$Q_c = q_{c1m} + q_{c2m} + q_{c3m} + q_{c4m} + q_{c5m};$$

$$\% \text{disp}(\text{strcat}('Q_s=', \text{num2str}(Q_s), ' Q_a=', \text{num2str}(Q_a), ' Q_c=', \text{num2str}(Q_c)));$$

$$\text{flux} = [q_{s1m}; q_{s2m}; q_{s3m}; q_{s4m}; q_{a1m}; q_{a2m}; q_{a3m}; q_{c1m}; q_{c2m}; q_{c3m}; q_{c4m}; q_{c5m}];$$

$$x3 = [\text{th}'; x(:,2)'; x(:,11)'; x(:,12)'];$$

$$\text{fid} = \text{eval}(['fopen('', \text{fsortida}, '', 'w')']);$$

$$\text{fprintf}(\text{fid}, '%12.6f %12.6f %12.6f %12.6f \n', x3);$$

$$\text{fclose}(\text{fid});$$

$$\text{fid} = \text{eval}(['fopen('', \text{fsortida2}, '', 'w')']);$$

$$\text{fprintf}(\text{fid}, '%12.6f \n', \text{flux});$$

$$\text{fclose}(\text{fid});$$

$$\text{sumary} = [T_{\text{smax}}; T_{\text{amax}}; T_{\text{cmax}}; T_{\text{emax}}; T_{\text{smin}}; T_{\text{amin}}; T_{\text{cmin}}; T_{\text{emin}}];$$

$$\text{fid} = \text{eval}(['fopen('', \text{fsortida3}, '', 'w')']);$$

$$\text{fprintf}(\text{fid}, '%4.1f \n', \text{sumary});$$



```
fclose(fid);  
eval(grafic);
```

ANNEX 3 : ARXIU “ CHEB “ DEL MODEL

```
function[D,x]=cheb(N)  
if N==0, D=0; x=1;return, end  
x=cos(pi*(0:N)/N)';  
c=[2;ones(N-1,1);2].*(-1).^(0:N)';  
X=repmat(x,1,N+1);
```



$$dX=X-X';$$

$$D=(c*(1./c)')./(dX+(\text{eye}(N+1))));$$

$$D=D-\text{diag}(\text{sum}(D'));$$



BIBLIOGRAFIA

1. **Chen, W., Liu, W.** "Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a lean-to greenhouse". *Renewable Energy* 31 (2006): 517-535.
2. **Buckminster-Fuller, R.** "How to get plants for a 30 foot dome" *Popular Mechanics* 1966.
3. **Fontanetta, J., Heller, Al.** "Building and using a solar geodesic greenhouse" 1979.
4. **Goswami, D.Y.** "Analysis of a Geodesic Solar Fruit Dryer". *Drying Technology* 9 (3) (1991): 677-691
5. **Davies, P.A., Paton, C.** "The Seawater Greenhouse in the United Arab Emirates: thermal modelling and evaluation of design options". *Desalination* 17 x (2005): 000-000.
6. **Singh, G., Singh, P.P., Singh Lubana, P.P., Singh, K.G.** "Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse" *Renewable Energy* 31 (2006): 1541-1560.
7. **Enrique Misle, A., Aldo Norero, Sch.** "Comportamiento Térmico del Suelo bajo Cubiertas Plásticas. Efecto del Polietileno transparente a diferentes profundidades" *Agricultura técnica*. V.62 n.1 Chillán (2002).
8. **Chen, W., Liu, W., Liu, B.** "Numerical and Experimental Analysis of Heat and Moisture Content Transfer in a Lean-to Greenhouse" *Energy and buildings* 38 (2006): 99-104.
9. **Zhu, S., Deltour, J., Wang, S.** "Modeling the Thermal Characteristics of Greenhouse Pond Systems" *Aquacultural Engineering* 18 (1998): 201-217.
10. **Gupta, A., Tiwari, G.N.** "Computer model and its Validation for Prediction of Storage effect of Water Mass in a Greenhouse: a Transient Analysis" *Energy conversion and Management* 43 (2002): 2625-2640.
11. **Tavares, C., Gonçalves, A., Castro, P., Loureiro, D., Joyce, A.** "Modelling an Agriculture Production Greenhouse" *Renewable Energy* 22 (2001): 15-20.
12. **Papadakis, G; Frangoudakis, A; Kytritsis, S.** "Mixed forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover" *J Agric Engng Res* 1992: 51:191-205.
13. **Stanghellini, C.** "Transpiration of the greenhouse crop canopies: an aid to climate management" *Phd dissertation, Agriculture University, Wageningen* 1987: xvi+150pp.



14. **Kindelan, M.** "Dynamic modeling of greenhouse environment" *Trans ASAE* 1980:1232-9.
15. **Abdel-Ghany, A; Kozai, T.** "On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a fog cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer" *Energy Conversion and Management* 47 (2006): 2612-2628.
16. "hivernacles agrícoles" *Tecnologies avançades en estudi i eficiència energètica*. Generalitat de Catalunya departament d'indústria i energia. ISBN: 84-393-1612-7. 1993.
17. **Carretero, A; Margalef, P.** "Proposta d'actuació per la producció hortícola en un hivernacle geodèsic amb sistema solar passiu" *TFC ESAB*. Gener 2008.
18. **Oca, J.** "Estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic en hivernacles, mitjançant tècniques de visualització de fluids en models a escala" *Tesi doctoral UDL*, setembre de 1996.



Escola superior d'Agricultura de Barcelona (E.S.A.B.)
Estudi d'un hivernacle solar passiu mitjançant l'aplicació d'un model matemàtic